



Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : Principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement

Françoise Chauvet

► To cite this version:

Françoise Chauvet. Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : Principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement. Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université Denis Diderot Paris 7, 1994. Français. <tel-01273231>

HAL Id: tel-01273231

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01273231>

Submitted on 12 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ PARIS 7
« Denis Diderot »

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de Docteur

Spécialité : Didactique des disciplines

Option : Didactique des Sciences Physiques et de la Technologie

par Françoise CHAUVET

CONSTRUCTION D'UNE COMPRÉHENSION DE LA COULEUR INTÉGRANT SCIENCES, TECHNIQUES ET PERCEPTION :

PRINCIPES D'ÉLABORATION ET ÉVALUATION D'UNE SÉQUENCE D'ENSEIGNEMENT

soutenue le 17 juin 1994 devant la commission d'examen composée de :

M. Pierre LÉNA	Président
Mme Françoise BALIBAR	
M. Michel BOYER	Rapporteur
M. Jean Louis MARTINAND	Rapporteur
M. Jon OGBORN	Rapporteur
Mme Laurence VIENNOT	Directeur de thèse

LABORATOIRE DE DIDACTIQUE DE LA PHYSIQUE
DANS L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

Je tiens à remercier très sincèrement

M. le Professeur P. Léna, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

M. le Professeur J.L. Martinand qui a contribué à ma formation en didactique et qui m'a fait l'honneur de sa présence à ce jury.

Mme et MM. les Professeurs F. Balibar, J. Ogborn et M. Boyer qui m'ont fait l'honneur de leur présence à ce jury.

Je tiens à exprimer à L. Viennot mes remerciements les plus vifs pour la confiance dont elle m'a honorée et pour la manière, toujours stimulante et amicale, dont elle a assuré la direction de ce travail.

Je remercie chaleureusement les membres de l'équipe du L.D.P.E.S. pour les discussions fructueuses tout au long de ce travail et, plus particulièrement, M. Méheut et G. Rebmann pour leur lecture critique et leurs remarques pertinentes.

Je remercie tout particulièrement P. Ettinger pour ses conseils précieux en matière de traitement statistique des données.

Que les collègues des écoles d'arts appliqués, Duperré et Boule, qui ont associé leurs élèves à cette recherche soient vivement remerciés de leur aimable collaboration.

Merci à R. Cori pour sa relecture minutieuse et à A. K. pour son soutien constant et son aide efficace en matière d'édition.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. CADRE DE LA RECHERCHE	1
1.1. La couleur au carrefour de plusieurs domaines	1
1.2. Analyse épistémologique : quelques repères historiques	2
1.3. Résultats de recherches didactiques	12
1.4. Effets possibles d'enseignements antérieurs dans le cursus secondaire sur les idées des élèves à propos de la couleur	15
1.5. Un « autre » concept de couleur à retenir pour une séquence d'enseignement	23
2. LA RECHERCHE : problématique et méthodes	24
2.1. Une séquence d'enseignement	24
2.2. Un ensemble de choix, des évaluations globales « interne » et « externe »	24
2.3. Analyse détaillée de la mise en oeuvre de la séquence : « carnet de notes »	26
3. PLAN DE LA THESE	27
CHAPITRE 1 : ENQUETE PRELIMINAIRE	29
1. LES ETUDIANTS D'ARTS APPLIQUES : leurs parcours antérieurs, les cadres d'enseignements reçus sur la couleur	29
1.1. Des origines diverses, souvent compensées par une « mise à niveau »	29
1.2. Cadre disciplinaire des enseignements reçus sur la couleur	30
2. LE QUESTIONNAIRE SUR LES CONNAISSANCES ET MODES DE RAISONNEMENTS AVANT ENSEIGNEMENT	32
2.1. Nommer les couleurs et les caractériser	32
2.2. Procédés de création de couleurs	33
2.3. Couleurs de l'arc-en-ciel	35
2.4. Addition de lumières et couleur	38
2.5. La nuit, tous les chats sont gris	40
3. ENTRETIENS EN PRESENCE DE DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX	42
3.1. Présentation	42
3.2. Produire « du jaune » par addition de lumière rouge et de lumière verte	43
3.3. Les ombres colorées	50
3.4. Récapitulation	56
4. CONCLUSION DE L'ENQUETE PRELIMINAIRE	57

CHAPITRE 2 : UNE SEQUENCE D'ENSEIGNEMENT	59
1. PRINCIPES DE CONSTRUCTION	59
1.1. Introduction	59
1.2. Les principaux choix de la séquence d'apprentissage	60
2. DESCRIPTION DE LA SEQUENCE	64
2.2. Phase 1 : poser le problème	65
2.3. Phase 2 : production de couleurs par soustraction	70
2.4. Phase 3 : réinvestissement et activité de synthèse	78
3. CONCLUSION	80
3.1. Tableau récapitulatif des épisodes de la séquence et points repris dans « carnet de notes »	81
CHAPITRE 3 : CARNET DE NOTES	83
1. MISE EN PLACE DES CONCEPTS FONDAMENTAUX :	
Degré d'acceptation et de réinvestissement	84
1.1. Première séance : quels effets ?	84
1.2. Addition de lumières : mémorisation ?	85
1.3. Rôle de l'oeil et du cerveau dans la perception de la couleur : acceptation ?	87
1.4. Diffusion et couleur : un « saut » conceptuel	90
2. INTRODUCTION DE LA SOUSTRACTION :	
Fonctionnement d'une articulation cible - outil	94
2.1. Ombres colorées sur un écran blanc	94
2.2. Analyse des réponses	95
2.3. Points marquants	99
3. ABSORPTION DE LUMIERE ET DIFFUSION :	
Persistance de difficultés et réorientation de questions	100
3.1. L'idée de soustraction dans la séquence	100
3.2. La situation expérimentale : ombre en lumière colorée sur un écran coloré	100
3.3. Les réponses	102
3.4. Remarques	103
4. MAITRISE DE L'IDEE DE CHAINE : Exemple de relatif aboutissement	104
4.1. La situation expérimentale : influence de la lumière sur la couleur des corps	104
4.2. Les réponses	106
4.3. Caractère convaincant de l'expérience après prévisions	109
4.4. Commentaires	110
5. CONCLUSION	110

CHAPITRE 4 : EVALUATION FINALE	113
1. INTRODUCTION	113
1.1. Un outil d'évaluation pour caractériser un éventail de compétences	113
1.2. Caractérisation des questions	114
2. EVALUATION INTERNE (DETAIL)	121
2.1. Introduction	121
2.2. Couleurs de l'arc-en-ciel	121
2.3. Synthèse additive et rôle du système visuel	124
2.4. Laser	126
2.5. Diffusion et couleur	128
2.6. Filtres et pigments	130
2.7. Couleur des corps en lumière blanche et colorée	133
2.8. Synthèses des couleurs	135
2.9. Contraste simultané	137
2.10. Points forts retenus par les étudiants	139
3. EVALUATION EXTERNE (DETAIL)	140
3.1. Introduction	140
3.2. Couleurs de l'arc-en-ciel	140
3.3. Addition de lumières	143
3.4. Croisement de faisceaux Laser	145
3.5. Diffusion et couleur	147
3.6. Filtres et pigments	149
3.7. Couleur des corps en lumière blanche et colorée	151
3.8. Synthèses des couleurs	154
3.9. Ombre et contraste simultané	155
3.10. Points forts retenus par les étudiants	158
4. CONCLUSION	159
CHAPITRE 5 : SYNTHESE	161
1. INTRODUCTION	161
2. LES RESULTATS PAR QUESTION	162
2.1. Questions peu discriminantes en termes de chaîne	162
2.2. Questions plus discriminantes du point de vue d'une analyse en terme de chaîne	169
3. COUPLES « ASPECT DE REPONSE / QUESTION » RETENUS	174
3.1. « Aspect de la réponse/question »	174
3.2. « Couples » comportant un aspect positif de réponse	174
3.3. « Couples » comportant un aspect inadéquat ou faux de la réponse	175

4. PROFILS CONCEPTUELS DES GROUPES	177
4.1. Premier type d'objets : « couples » comportant des aspects positifs	177
4.2. Deuxième type d'objets : obstacles et difficultés persistantes	178
4.3. Points marquants	179
4.4. Autre méthode	180
CONCLUSION	183
BIBLIOGRAPHIE	187
ANNEXES	
Annexe 1 : questionnaires	
Annexe 2 : rappels de photométrie, lexique, notes techniques, article	
Annexe 3 : carnet de notes, impressions d'ensemble	
Annexe 4 : programmes officiels	
Annexe 5 : analyse en composantes principales	

INTRODUCTION

1. CADRE DE LA RECHERCHE

1.1. La couleur au carrefour de plusieurs domaines

L'engouement actuel pour la couleur constitue pratiquement un fait de société, du moins si l'on en juge par les nombreuses manifestations organisées autour de ce thème ces dernières années, colloques (Beaubourg, Paris 1992, Bruxelles 1993, *Couleurs et Monde vivant* à la Cité des Sciences et de l'Industrie (CSI)-La Villette, Paris 1994), ou expositions (*Des teintes et des couleurs* au Musées des arts et traditions populaires en 1988, *La lumière dans tous ses états* à la CSI, à Paris en 1988, *Vision des couleurs* à Villeneuve d'Ascq en 1990). C'est l'occasion de rassembler un grand nombre de disciplines allant des sciences à la philosophie, en passant par les arts.

Nous avons nous-mêmes participé avec des groupes d'élèves aux « *classes intermusées sciences et art* » menées conjointement par la Direction des Musées de France et le service Education de la CSI. L'un des thèmes retenus a été celui de la couleur.

Ce thème apparaît donc comme riche et motivant dans le cadre du développement d'activités scientifiques hors de l'école. Pourtant, comme le note E. Caillet (1989) à propos des classes de la CSI, ces lieux d'ouverture ne sont pas des lieux de synthèse. Si ce thème nous est apparu fréquemment traité dans le cadre de la vulgarisation et des expositions culturelles et scientifiques, comment peut-on l'aborder dans l'école ?

Plus spécifiquement, peut-on promouvoir une compréhension à la fois synthétique et efficace chez un public de futurs techniciens non scientifiques et de niveau post-baccalauréat, amenés à aborder ce sujet sous des aspects variés ? Telle est notre question de départ.

Celle-ci s'inscrit dans un questionnement plus large sur le statut de la physique dans un enseignement technique d'arts appliqués. Dépouillée du statut de discipline fondamentale dont elle dispose dans l'enseignement général, la physique prendrait-elle alors celui d'un élément de culture, relativement découplé du reste, équivalent à celui de l'enseignement artistique dans l'enseignement général ? Ou bien peut-elle prétendre à une véritable articulation avec les autres domaines d'enseignement ? Si tel est le cas, ce thème de la couleur, abordé sous de multiples aspects dans l'enseignement artistique, est un terrain de choix, sinon un véritable défi au désir d'unification.

Nous avons choisi d'aborder ces questions à travers la conception et la mise en oeuvre d'une séquence d'enseignement destinée à ce public, et dont le maître mot soit celui d'« **intégration** ». Il s'agit en effet d'apporter des éléments de connaissance et des outils de raisonnement qui permettent d'intégrer les phénomènes de couleur dans un champ de cohérence où les étudiants puissent

s'orienter rationnellement, à coût raisonnable. L'exclusivité de la physique est alors, bien entendu, ... exclue ! Ce champ de connaissances doit contribuer à cimenter les acquis conceptuels en provenance d'autres domaines où ces phénomènes sont mis en jeu.

Le choix d'un contenu orienté par un objectif d'intégration s'appuie sur une analyse du développement historique des connaissances, des résultats de recherches en didactique et des conditions actuelles de l'enseignement sur le sujet (jusqu'en 1993). Ces trois aspects développés dans les points suivants délimitent le cadre d'élaboration d'une séquence d'enseignement sur la couleur.

1.2. Analyse épistémologique : quelques repères historiques

Nous indiquons dans la suite quelques repères portant sur l'histoire de l'élaboration des connaissances à propos de la couleur sur lesquels il nous a semblé utile de revenir pour éclairer nos choix d'élaboration de contenus. Ces connaissances se sont développées dans plusieurs domaines, celui de la physique et des techniques et celui de la neurophysiologie et de la psychologie.

Pour décrire ici les principales étapes, nous nous appuyons sur trois études récentes d'histoire des sciences relatives aux concepts de lumière et de couleur (Ronchi 1956, Maitte 1981, Blay 1989).

1.2.1. Lumière et couleur

Actuellement lumière et couleur sont deux concepts intimement liés, mais cette liaison a constitué, historiquement, un tournant décisif dans l'évolution du concept. Celle-ci est unanimement attribuée à Newton par les historiens des sciences.

1. Avant Newton

Avant le XVII^e siècle, la lumière et la couleur sont considérées comme deux choses nettement distinctes l'une de l'autre : d'une part, la couleur est une qualité des objets, au même titre que leur forme, d'autre part, la lumière est incolore, pure. Selon les théories aristotéliennes, largement partagées au Moyen-âge, elle a pour fonction de véhiculer la couleur vers les yeux de l'observateur selon un mécanisme comparable à celui d'« écorces qui se détachent des objets » transportant ainsi leur couleur (*Lucrèce, cité par Maitte*).

Très tôt, vers l'an 1000, sur la base d'observations et d'études systématiques, Alhazen établit l'optique sur des bases de nature physiologique, où le rôle de l'oeil est pris en compte :

« *La lumière directe et les couleurs illuminées blessent les yeux* » (cité par Ronchi, p. 35).

Expérimentant avec la lumière blanche et avec les objets colorés, il constate que l'impression persiste même les yeux fermés et conclut que

« *Tout ceci démontre que les couleurs illuminées produisent un effet sur l'oeil* » (*ibid.*)

Ses observations sur la vision, l'anatomie de l'oeil et les phénomènes visuels qu'il nomme *deceptionnes visus*, l'amènent à une théorie sur la nature de la lumière. Toutefois la distinction entre lumière et couleur persistera jusqu'à la fin du XV^e sous une forme proche des vues aristotéliennes.

De tout temps, l'observation de l'arc-en-ciel a suscité des questions sur l'origine de la couleur. Quatre siècles avant Newton, Bacon (1214-1294) interprète ces phénomènes colorés en termes de réflexions et de réfractions successives dans les gouttes de pluie, des couleurs différentes correspondant à des angles de réfraction différents. Cependant les couleurs sont envisagées comme « *des mélanges de deux quantités opposées d'« éclat » et d'« obscurité » qui donnent en quantités égales la lumière blanche* » (Thierry de Freiberg cité par Maitte, p. 37).

Un pas de plus est fait par Kepler (1604) pour qui « *la couleur est lumière en puissance* » et la lumière « *se colore* » à travers les corps, d'autant plus intensément que l'épaisseur traversée est plus grande (cité par Ronchi, p. 76).

Mais jusqu'en 1664, la couleur est conçue comme résultant, non d'une lumière spécifique, mais de la lumière blanche altérée dans sa nature par un mélange d'ombres. La succession des couleurs est ainsi produite lorsque la lumière devient plus faible ou plus sombre.

Descartes, reprenant l'idée que des couleurs différentes correspondent à des angles de réfraction différents, suggère une interprétation où les diverses couleurs sont produites par les surfaces. Elles résultent des modifications d'orientation et de vitesse que peut subir le rayon lumineux à la manière d'une balle qui rebondit en tournant plus ou moins sur elle-même.

Contrairement à l'opinion de Descartes, Grimaldi, avec la découverte du phénomène de diffraction (*De Lumine* 1665), montre que la lumière contient les couleurs et qu'elle se colore sans intervention ni de réflexion, ni de réfraction, ni de changement de milieu transparent.

La couleur comme qualité physique est clairement distinguée par ces physiciens de la couleur comme qualité sensible, sensation ou perception.

2. Newton et l'expérience « cruciale »

Dès 1666, Newton émet, en contradiction avec Descartes, l'hypothèse selon laquelle

« *il n'y a pas de surface susceptible de permettre à tous les rayons de converger en un foyer, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de telles surfaces si la lumière est un mélange de rayons différemment réfrangibles* ».

Selon M. Blay (1983) qui analyse des textes de Newton antérieurs à la publication de l'*Opticks* (1704), les expériences sont construites pour vérifier les deux hypothèses essentielles :

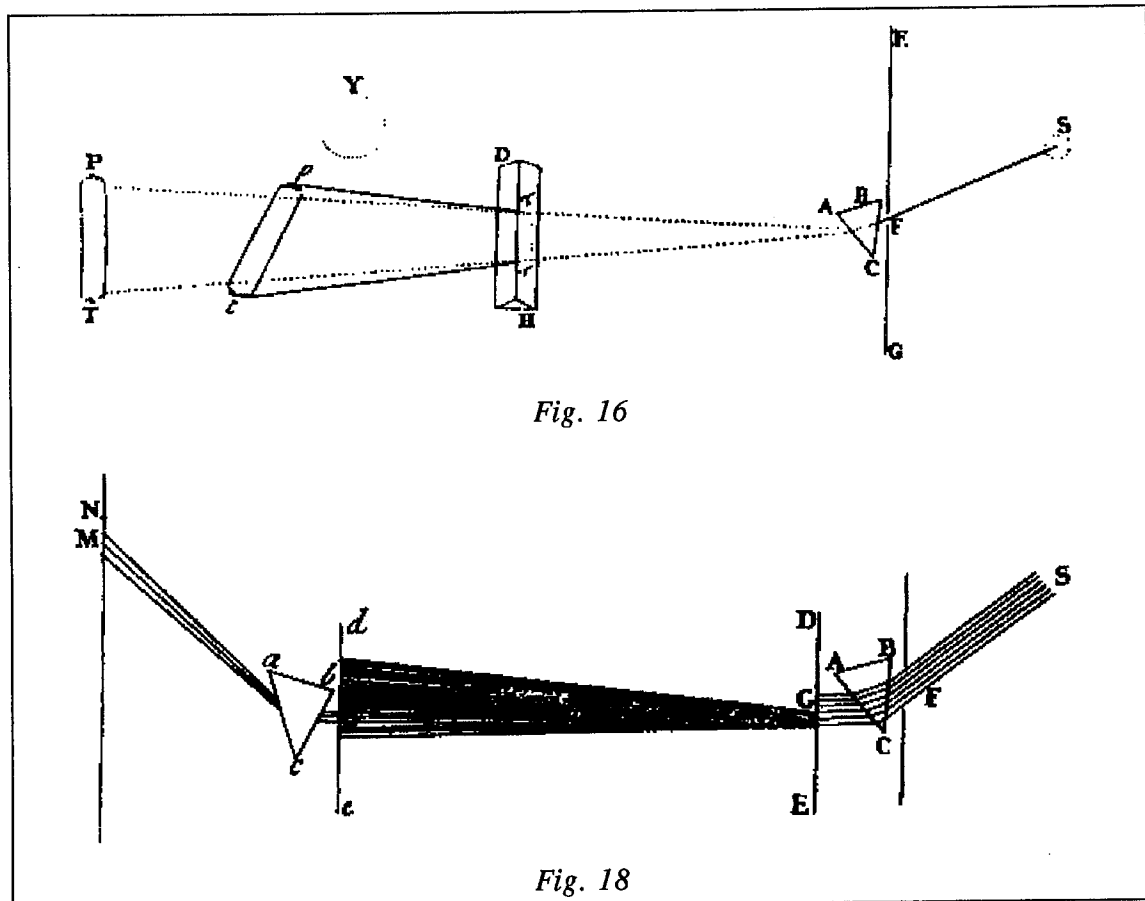
« les rayons de lumière qui diffèrent en couleur, diffèrent aussi en degré de réfrangibilité » (en indice de réfraction) (*Opticks*, Liv I, Part I, p. 19)

et « la lumière du soleil est composée de rayons différemment réfrangibles » (*ibid.* Liv I, Part I, p. 26).

Les expériences, décrites avec un soin minutieux, sont organisées en une suite logique qui culmine vers l'expérience que Newton qualifie de « *cruciale* » (celle où les rayons de lumière passent successivement à travers deux prismes, voir encadré 1, fig. 18), montrant que

« les couleurs ne sont pas des modifications de la lumière produite par la réfraction et que les couleurs qui ont été séparées selon l'amélioration précédente ne peuvent plus être séparées par une nouvelle réfraction » (*ibid.* p 47, fig. 18).

Encadré 1



Alors qu'elle apparaît « *plutôt comme une expérience mise en place pour développer une hypothèse formulée antérieurement* », l'expérience cruciale est présentée dans l'exposé de Newton comme « *l'expérience fondatrice, celle à partir de laquelle la théorie des couleurs semble se livrer directement au regard innocent* » (Blay p. 390). On peut noter ici qu'elle garde le même statut dans les ouvrages actuels d'enseignement (voir §1.4.).

Newton effectue ainsi la **première analyse de la lumière** en séparant les composantes qui produisent des couleurs différentes :

« Faire en sorte que les rayons hétérogènes d'une lumière composée soient séparés les uns des autres » (Newton 1704, p. 68).

Newton introduit également des mesures : à chaque tache de couleur élémentaire est associée une position sur l'écran (encadré 1, fig. 16). Les caractéristiques géométriques des différentes images sont interprétées comme résultant d'une différence d'indice de réfraction. **A une couleur, produite par une lumière simple, correspond alors une grandeur mesurable.**

Ces éléments ont établi les travaux de Newton comme fondements du concept de couleur pour le physicien.

Parallèlement à l'étude de la lumière solaire, Newton effectue une série d'expériences sur la couleur des corps pour montrer que la lumière venant des corps colorés a les mêmes propriétés :

« Ainsi la lumière qui vient à l'oeil de la moitié bleue du papier à travers le prisme, souffre une plus grande réfraction que la lumière qui vient de la moitié rouge et par conséquent , elle est plus réfrangible » (ibid. p. 19).

On notera que pour Newton, le sens de « couleur » comme sensation^{☆1} est clairement exprimé et cette sensation est distinguée de la lumière qui la produit :

« les rayons qui paraissent rouges, ou plutôt qui font paraître les objets rouges, je les appelle rayons rubrifiques ou causant le rouge, [...] car à proprement parler les rayons ne sont pas colorés, n'y ayant autre chose en eux qu'une certaine disposition à exciter une sensation de telle ou telle couleur » (ibid. p. 139).

3. Les physiciens après Newton

Les hypothèses de Newton sont indépendantes de ses conjectures sur la nature de la lumière, comme il le précise lui-même. Cette question fondamentale de la nature de la lumière (corpusculaire ? ondulatoire ?) sera l'objet d'une recherche plus approfondie, qui se poursuivra jusqu'au XX^e siècle.

En 1802, Young propose sa théorie ondulatoire de la lumière, et, à partir de l'étude des lames minces, calcule pour la première fois les « *longueurs d'ondulations* », c'est-à-dire les longueurs d'onde des vibrations lumineuses correspondant aux couleurs observées par Newton (Saillard 1988).

Chez les physiciens du XIX^e siècle, c'est le souci de la mesure qui domine : apparaît la spectroscopie, étude quantitative des spectres, non seulement de la

1. Le lecteur trouvera dans l'annexe 2 un lexique de quelques termes spécifiques du langage courant et technique qui sont repérés dans le texte par ☆.

lumière solaire, mais aussi des spectres d'absorption et d'émission de différentes substances.

Dès le XVIII^e siècle, les philosophes discutent certains aspects de la perception des couleurs pour contester la théorie de Newton (Goethe 1810). On voit là se profiler toute la difficulté d'une compréhension intégrée d'un domaine relevant à la fois de la rationalité physique et des « mystères » de la perception.

1.2.2. Couleur et vision

La prise en compte de l'oeil et des effets perceptifs par les physiologistes rejoint les préoccupations des philosophes. La question de la vision des couleurs est au centre du travail des physiologistes, notamment à propos des anomalies décrites par Dalton (1794). Sur la base d'observations montrant qu'il est possible de créer le plus grand nombre de teintes à partir de trois couleurs principales : le rouge, le vert et le bleu, Young suggère, dès 1801, que la trichromie s'explique par le fonctionnement de l'oeil. Il suppose l'existence de trois types de fibres répondant de façon privilégiée aux trois couleurs rouge, vert et bleu.

La colorimétrie se développe à partir du milieu du XIX^e avec Helmholtz, Grassmann et Maxwell comme branche de l'« *Optique physiologique* » (Helmholtz 1867). La prise en compte de l'oeil de l'observateur en est un élément fondamental.

Sur le mécanisme de la vision des couleurs, deux théories principales se sont affrontées, celle de Young-Helmholtz et celle de Hering. Helmholtz, dès 1852, précise que les fibres présentent une sensibilité maximale aux trois couleurs fondamentales rouge, vert et bleu, et, que le choix des trois primaires² est arbitraire, respectivement dans chacun de ces trois domaines de couleur. Cette théorie, adoptée par Maxwell en 1855, permet d'interpréter le mélange additif des lumières colorées : lorsque la perception est « blanc », il y a réponse des trois types de récepteurs ; lorsque la perception est « jaune », par exemple, les fibres sensibles au rouge et au vert sont affectées. Le fait trichrome - trois sensations élémentaires suffisent pour produire toutes les sensations de couleur - constitue un fait expérimental sur lequel s'appuie le repérage de la couleur.

Hering (1878) propose, lui, une première modélisation des mécanismes de la vision des couleurs à partir de l'existence de six sensations distinctes. Il fait l'hypothèse de trois systèmes de base répartis en trois couples de couleurs antagonistes, rouge/vert, bleu/jaune, noir/blanc (théorie des processus antagonistes[☆]).

L'hypothèse de Young a reçu une confirmation dans le domaine physiologique : on a pu trouver trois types fondamentaux de cellules photo

2. On appelle couleurs primaires un ensemble de trois couleurs permettant, par mélange, d'obtenir une gamme de couleurs la plus large possible. Il faut distinguer, suivant la nature des phénomènes impliqués, les primaires de la synthèse additive[☆] qui sont rouge, vert et bleu-violet (mélanges de lumières, vidéo...) et les primaires de la synthèse soustractive[☆] qui sont les rouge-magenta, jaune et bleu-cyan (mélanges de peintures...). Nous y reviendrons au chapitre 2.

réceptrices, appelées *cônes*. Les mesures, faites au début des années 1960, confirment que les pigments des cônes absorbent selon des bandes très larges qui se recouvrent et présentent des maximums respectifs pour des longueurs d'onde d'environ 565, 535 et 420 nm chez les humains (Buser, Imbert 1987).

Dans les études sur les phénomènes psychologiques de la vision, effets perceptifs classiquement appelés « illusions d'optique », une part importante est accordée à la vision des couleurs. Les questions que posent ces études sortent du cadre de cette première modélisation. Cependant nous utilisons dans la suite « *la loi sur les contrastes simultanés[☆] des couleurs* » énoncée par Chevreul (1839), et les observations qu'il décrit où une couleur est perçue en fonction des couleurs des plages avoisinantes.

D'autres phénomènes sont observés par les psychologues, notamment la *constance de la couleur[☆]*, c'est-à-dire le fait de voir les objets familiers de la même couleur alors que la composition de la lumière qui les éclaire a changé. Ces faits ne trouvent pas d'explication dans l'interaction de la lumière avec les photorécepteurs de la rétine.

Toutes les recherches qui se sont développées dans les vingt dernières années contribuent à montrer la complexité des phénomènes de vision des couleurs (Zéki 1990), l'importance du système cérébral (Land 1977) et conduisent à penser les phénomènes de couleur dans leur globalité. La vision des couleurs devient un moyen d'étude du fonctionnement du cerveau (Varela 1991).

« *Art, psychologie et neurobiologie contribuent à un processus d'enrichissement mutuel par un échange multilatéral d'informations fondé sur une meilleure connaissance du fonctionnement cérébral* » (Livingstone 1984).

1.2.3. Mesures sur la couleur

1. Le développement de la colorimétrie

Sherman (1981) souligne, dans un ouvrage d'histoire de la vision des couleurs au XIX^e siècle, que les avancées d'interprétation de la vision des couleurs et la découverte du fait trichrome ont été décisives pour le développement de la colorimétrie. Cette science, comme la photométrie, est basée sur des observations expérimentales faites sur le sujet humain. L'un des objectifs est de définir et de mesurer la réponse de l'oeil aux radiations lumineuses.

Bouguer (1729) est considéré comme le premier à surmonter les difficultés liées aux mesures sur la lumière en proposant des mesures de zéro : l'oeil de l'observateur est utilisé comme comparateur et décide si deux plages sont identiques ou non.

Grassmann (1853) énonce des lois quantitatives sur les mélanges de lumières : toute couleur peut être obtenue par le mélange additif[☆], en proportion convenable, de trois lumières choisies arbitrairement dans le bleu, le vert et le rouge.

Maxwell (1854), sur cette base quantitative, mesure par des méthodes d'égalisation photométrique les flux respectifs des trois lumières primaires

nécessaires pour caractériser une couleur quelconque et montre le caractère reproductible de telles mesures pour des sujets à vision normale.

La couleur, sensation visuelle, est ainsi repérée par **trois caractéristiques physiques du stimulus** qui la produit. Une même couleur perçue peut avoir pour origine des lumières de distributions spectrales différentes, soit quasiment monochromatiques, soit polychromatiques, puisque devant un mélange de radiations, le système visuel ne peut pas en déterminer les composantes.

La colorimétrie contemporaine reconnaît ainsi comme principe fondamental qu'un jeu de trois variables est nécessaire et suffisant pour décrire tous les faits de la vision des couleurs. Schroedinger (1920) pose que la structure de l'ensemble des stimuli de couleur est une structure d'**espace vectoriel de dimension 3** isomorphe à l'espace géométrique usuel. Les mesures de la sensibilité relative de l'oeil humain aux différentes radiations, dans des conditions d'observation précises, permettent d'établir une norme définissant l'oeil humain moyen.

De ces travaux de normalisation, de l'oeil humain, des sources d'éclairage et des conditions d'observation, sont issus, depuis 1931, les différents systèmes de repérage des couleurs proposés par une Commission Internationale de l'Eclairage.

2. Les systèmes de classification de couleurs

Une meilleure compréhension de la différence fondamentale entre mélanges de lumières et mélanges de matières, point capital clarifié par Helmholtz, a donc conduit à des espaces vectoriels tridimensionnels de couleurs, dans lesquels les couleurs des objets sont incorporées.

Mais, parallèlement, de nombreux systèmes de classification de couleurs se sont succédés. Ils sont basés sur des **caractéristiques perceptives** de teinte, de saturation^{*} et de luminosité et sur des arrangements systématiques des couleurs. Parmi les plus anciens, celui de Newton représente les couleurs pures sur la circonférence d'un cercle dont le centre est le lieu du blanc (encadré 2, figure 1). Un tel système ne se prête qu'à l'étude de deux propriétés de la couleur, la teinte et la saturation.

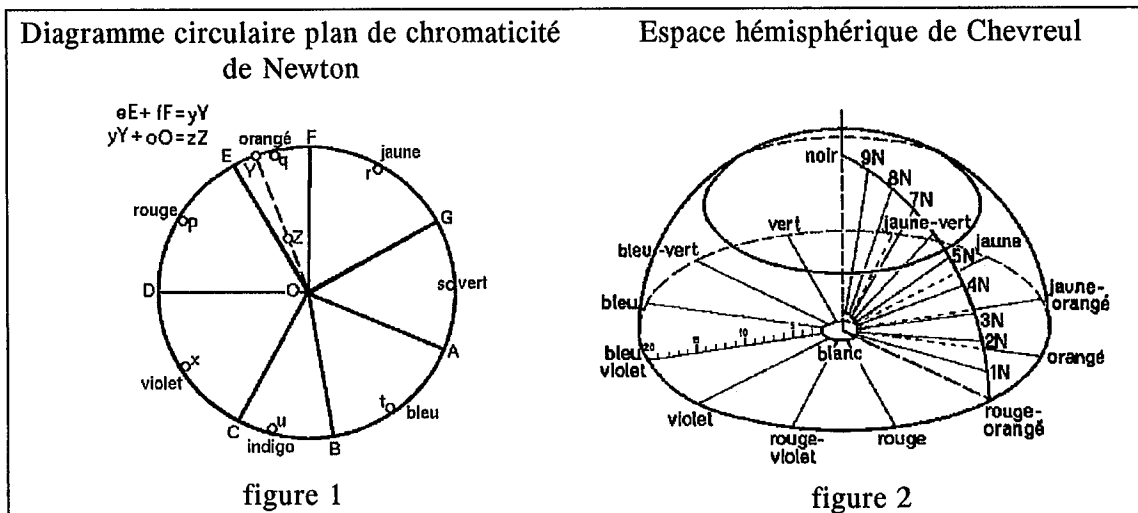
Celui de Chevreul comporte également sur un plan horizontal le cercle des couleurs saturées avec le blanc au centre, mais le noir est disposé en haut du demi axe vertical (encadré 2, figure 2). Il lui est associé une des plus remarquables gammes d'échantillons classés de façon systématique : un nuancier de 14 400 échantillons de laine teinte par Chevreul aux Gobelins.

Actuellement, les industries travaillant avec la couleur sous forme de colorants ou de pigments utilisent des réseaux uniformes³ de couleurs matérielles constituant des systèmes de repérage des couleurs. Ces systèmes varient avec le pays et le type d'applications. Parmi les plus importants actuellement, on note le

3. Les échantillons de couleurs sont disposés de telle sorte que les écarts successifs de couleur soient perçus comme des intervalles égaux.

système américain de Munsell et le système DIN⁴ de normalisation allemande. Des systèmes spécifiques, « Pantone » par exemple, sont utilisés en industries graphiques : ils donnent la composition du mélange d'encre de base pour obtenir une couleur donnée.

Encadré 2



1.2.4. Repères historiques sur le développement des techniques

Les procédés de teinture ont longtemps utilisé trois colorants végétaux essentiels : la gaude pour produire le jaune, le pastel puis l'indigo pour produire le bleu, et la garance pour produire le rouge. Leur mélange permet l'obtention d'une gamme étendue de couleurs produite par synthèse soustractive^{*}. Le développement des colorants de synthèse à la fin du XIX^e siècle a rendu très complexe ce secteur par la quantité très importante de colorants à adapter à chaque type de support.

Dans le domaine de l'impression, la production des images colorées est basée sur la superposition ou la juxtaposition de couches d'encre de couleur jaune, cyan et magenta (que les imprimeurs appellent jaune, bleu et rouge).

Il en est de même en photographie couleur (inventée par Maxwell en 1859 sur le principe de la trichromie), où la restitution des couleurs se fait par des couches superposées de colorants, respectivement jaune, cyan et magenta (Romer 1990).

A ces procédés utilisant la synthèse soustractive, s'ajoutent maintenant des procédés utilisant la synthèse additive de trois lumières colorées fondamentales : rouge, vert et bleu.

Apparu dans les années 1960, le tube cathodique couleur a constitué une véritable révolution technologique et culturelle. Aux images obtenues sur support photographique, s'ajoute une nouvelle génération d'images en couleur, les images vidéo.

4. Deutsche Industrie-Norm

Au début des années quatre-vingts, le développement de la micro-informatique a bouleversé le domaine de la création d'images. Les images informatiques et leurs applications en dessin assisté par ordinateur (DAO) ou publication assistée par ordinateur (PAO) se sont multipliées, nécessitant de la part des utilisateurs une nouvelle approche de la création de couleurs, basée sur la production de lumières fondamentales rouge, verte et bleue.

Dans le même temps, les secteurs industriels des matières colorantes, dont les activités vont de la fabrication de peintures à celles d'encres d'imprimerie, de colorants pour textiles et de produits de beauté, utilisent des systèmes informatisés de classification des couleurs. Couplés à un spectrocolorimètre, ces systèmes sont destinées à faciliter le choix de couleurs spécifiques, la reproduction d'échantillons à l'identique et la mesure des écarts de couleur. Ces méthodes s'ajoutent actuellement à, ou tendent à remplacer, l'oeil du coloriste, éduqué par une pratique à distinguer de très fines nuances de couleur.

Les connaissances de base pour la maîtrise de ces outils relèvent alors d'une compréhension intégrée des phénomènes physiques (prise en compte des flux lumineux et de la composition de la lumière), techniques (caractéristiques des matériaux et leur action sur la lumière) et perceptifs (données sur l'observateur humain).

1.2.5. Le concept de couleur aujourd'hui

Le concept de couleur, abordé dans des disciplines disjointes qui se sont développées séparément, fait aujourd'hui l'objet de points de vue convergents.

La perception de la couleur est un phénomène subjectif dont l'analyse fait intervenir des résultats en provenance de plusieurs domaines de recherche : physique (composition spectrale du rayonnement), neurophysiologique (fonctionnement de l'oeil et du système visuel) et psychologique.

Le consensus actuel est que la couleur perçue résulte d'une « mesure » effectuée par l'oeil et de l'interprétation par le cerveau de cette mesure : celui-ci retient principalement la longueur d'onde dominante, associée à la caractéristique de teinte.

Mais nous retiendrons qu'une couleur ne peut pas être définie par une lumière monochromatique caractérisée par une grandeur physique mesurable, la longueur d'onde. Cette hypothèse simplificatrice s'accorde pourtant avec le point de vue des physiciens qui considèrent l'optique comme science de la lumière, sans référence aucune à l'oeil. Cependant, elle ne rend pas compte du fait que la couleur n'est pas perçue par une seule cellule, mais résulte de la comparaison, effectuée au niveau cérébral, des fréquences des impulsions provenant de cônes voisins des trois types, qui ont reçu le même faisceau. **C'est la contribution relative des différentes longueurs d'onde et donc la composition spectrale qui détermine les différentes couleurs.**

Cette prise en compte de la composition spectrale est encore insuffisante pour rendre compte de phénomènes comme le contraste simultané[☆] ou la constance[☆] de la couleur.

La définition de la couleur, donnée par le dictionnaire de colorimétrie théorique et technique, se situe dans le domaine de la psychophysique, puisqu'il intervient deux niveaux : celui d'une caractéristique de lumière et celui de la sensation qui en résulte,

« caractéristique du rayonnement visible permettant à l'observateur de distinguer des différences entre deux objets identiques dans leur forme, dimensions et structures identiquement placés, ces différences étant de même nature que celles que produirait une différence de composition spectrale du rayonnement intervenant dans l'observation » (norme expérimentale X 08.000 (AFNOR 1975)).

Un commentaire précise :

« la couleur est l'aspect de la perception visuelle qui permet de distinguer deux objets identiques dans leur forme, dimensions et structures... ».

Il met l'accent sur la composition spectrale de la lumière, limite le champ expérimental, tout en laissant la place à des phénomènes visuels plus globaux.

En revanche, la définition plus courante du petit Robert fait apparaître l'existence des deux versants mal intégrés pour cette notion de couleur : l'un est lié à la lumière et l'autre à la matière,

« Caractère d'une lumière, de la surface d'un objet (indépendamment de sa forme), selon l'impression visuelle particulière qu'elles produisent ; propriété que l'on attribue à la lumière, aux objets, de produire une telle impression.

« Toute couleur autre que blanc, noir ou gris.

« Substance que l'on applique sur un objet pour produire la sensation de couleur (pigment...) ».

1.2.6. Récapitulation

Ce rapide résumé suffit à souligner la diversité des approches qui ont contribué à cerner les phénomènes de couleur, à y introduire mesures et repérages, à en dominer les techniques. L'aboutissement actuel s'est fait à travers une imbrication de ces approches, dont la cohérence s'est établie progressivement. Encore maintenant la trace de cette multiplicité d'approches se retrouve dans les différents sens du mot « couleur » dont nos dictionnaires se font l'écho.

Mais l'évolution actuelle des connaissances sur la vision et la diffusion massive des techniques de production de couleurs ne laisse plus guère de chance de maîtrise à des utilisateurs qui n'auraient pas acquis une compréhension intégrée d'éléments de base en provenance de chacune des disciplines-sources concernant la couleur.

1.3. Résultats de recherches didactiques

1.3.1. Raisonnements communs chez les adolescents

On ne peut envisager un enseignement sur ce domaine à la fois complexe, on vient de le voir, et associé à des aspects multiples du vécu des étudiants sans s'interroger sur ce que peuvent être les connaissances et modes de raisonnements de ceux-ci au moment d'aborder cet enseignement. Ceci répond du moins au point de vue maintenant largement partagé, à la suite de Bachelard et de Piaget, selon lequel l'étudiant construit ses connaissances à partir de celles dont il dispose déjà, dans une négociation dont les modalités sont décrites diversement dans les différentes positions dites constructivistes, mais dont l'existence et l'importance cruciale sont communément reconnues.

Dans de nombreux domaines, les conceptions et les modes de raisonnement communs se révèlent souvent être d'une grande résistance. On peut donc s'attendre dans notre public de jeunes adultes à trouver des conceptions proches de celles des adolescents ou même de celles, plus naïves, des enfants.

Les nombreux travaux menés depuis quinze ans en didactique sur les conceptions dans le domaine de l'optique ont conduit à une analyse des idées des élèves (enfants et adolescents) et ont permis d'en établir une classification par sujet, récapitulée par Tiberghien (1983), et plus récemment par Bouwens (1987).

1. Sur la lumière et la vision

Nous retiendrons ici plus particulièrement ce qui concerne la lumière et ses propriétés, et la vision.

La première difficulté réside, pour les enfants les plus jeunes, dans le fait que la lumière, confondue soit avec la source soit avec l'effet produit, n'est pas envisagée comme entité distincte et possédant certaines propriétés (Guesne 1976 et 1978, Tiberghien et al. 1980). Si les chercheurs notent une évolution avec l'âge dans le fait de concevoir la lumière comme une entité physique dans l'espace, des difficultés subsistent à propos de la lumière et de ses interactions avec la matière : l'existence de la lumière diffusée par les objets éclairés est rarement explicitée par les élèves de 13-14 ans et la différence entre réflexion spéculaire et réflexion diffuse est souvent confuse chez les élèves plus âgés (Bouwens 1987).

D'autre part, le rôle de la lumière comme agent responsable de la **vision** est insoupçonné chez les élèves avant enseignement. Si, pour le plus grand nombre, la lumière est reliée à la vision par le fait que sans lumière on ne peut pas voir, pour certains

« la vision est perçue comme un processus actif de la part de l'observateur, l'oeil envoie des rayons qui reviennent vers la tête avec un message ou une image » (Guesne 1977).

Ceci a été confirmé depuis par de nombreux travaux (Jung 1981 et 1987 en Allemagne, Andersson et Kärqvist 1983 en Suède, La Rosa et al. 1984 en Italie, Osborne et Stead 1980 en Australie) et repris tout récemment par Osborne et Black (1993) dans une étude systématique des liens que les enfants établissent

entre la source, l'objet et l'oeil. Ces liens sont figurés sous forme de traits, orientés ou non, dans les schémas produits à propos du phénomène de vision. Les auteurs notent que les enfants, après avoir pratiqué une série d'activités ouvertes, utilisent un modèle explicatif qui peut changer d'une situation à une autre.

Après enseignement, les adolescents (15-18 ans) continuent de découpler lumière et vision,

« Although pupils do not see clearly that light rays of a visible object have to enter the eye on every occasion, they do realise that the presence of light in the environment of the object is a minimum condition for seeing it » (Bouwens 1987).

On peut ajouter les recherches montrant que les maîtres - et plus généralement les adultes - partagent les difficultés des adolescents dans le domaine de l'optique géométrique lorsqu'il s'agit d'utiliser la notion de propagation isotrope de la lumière ou l'idée qu'il est nécessaire de recevoir la lumière dans l'oeil pour voir (Feher et Rice 1987, Perales 1989, Kaminski 1989 et 1991). Sur ces mêmes notions, les conceptions et les modes de raisonnement du public des étudiants d'arts appliqués présentent les mêmes caractéristiques (Chauvet 1990).

2. Sur la couleur

Notons d'abord que la couleur - précisément la lumière colorée - est plus fréquemment utilisée comme moyen d'investigation que comme objet d'étude en soi dans les recherches sur les conceptions. Colorer la lumière et lui donner des caractéristiques plus aisément perceptibles doit permettre aux élèves d'explicitier plus simplement les propriétés attribuées à la lumière.

Lorsque des questions ou des situations mettant en jeu la couleur sont utilisées, les réponses des élèves se réfèrent d'abord au sens commun et à l'expérience de la vie quotidienne. Ainsi la couleur est considérée par les enfants comme une propriété caractéristique de l'objet au même titre que sa forme ou sa texture (Zana 1986, Feher 1990).

Il en est de même pour des élèves de 16-17 ans, avant enseignement. Lorsque ceux-ci sont interrogés sur les changements de couleur d'objets éclairés avec des lumières colorées ou vus à travers des verres colorés, la presque totalité des réponses comporte l'idée que

« la couleur de la lumière est ajoutée à la couleur naturelle de l'objet (couleur de l'objet observé en lumière naturelle) » (La Rosa 1984).

Lumière et vision des couleurs ne sont liées que par l'idée qu'il faut suffisamment de lumière pour voir les couleurs.

Les effets de l'enseignement traditionnel d'optique peuvent être repérés avec les étudiants et les maîtres en formation. A des questions à propos de lumières et d'objets colorés, posées après enseignement, la moitié environ des étudiants interrogés (17-20 ans) donne la bonne réponse (Saxena 1991). Mais rien ne permet d'affirmer que les actions du filtre et de l'objet coloré sur la lumière

incidente soient correctement analysées. C'est une difficulté pour les étudiants, que les auteurs retiennent :

« Many students could not see the difference between responses, "White light is absorbed and red light is emitted" and "Only red light is allowed to pass through", perhaps due to the word "emitted" ».

Bon nombre de maîtres en formation en physique et sciences naturelles manifestent un manque de connaissances à propos des phénomènes où intervient la couleur. D'une part, le phénomène de dispersion est confondu avec celui de diffusion et celui de diffraction, et d'autre part, un prisme montre, selon eux, soit des propriétés de réfraction, soit des propriétés de dispersion : que le prisme agisse sur la lumière par réfraction sélective n'est pas compris (Perales 1989).

1.3.2. Remarques sur les points de vue des chercheurs

Dans la plupart des travaux de recherche en didactique où des connaissances d'origine scolaire entrent en jeu, on ne trouve pas trace d'une analyse critique du contenu conceptuel classiquement enseigné à propos de la couleur. La couleur est présentée comme une propriété de la lumière, *« white light consists of seven colours »* (Saxena 1991), souvent associée à une lumière monochromatique :

« le prisme disperse la lumière en couleur pure spectrale » (Perales 1989).

Les chercheurs partagent le point de vue que Bouwens (ibid.) caractérise ainsi :

« les élèves ne distinguent pas les propriétés de la couleur physique dans l'environnement (physical colour properties) des propriétés physiologiques de la perception de la couleur par le cerveau ».

Le découpage en domaines de connaissance disjoints n'est pas non plus remis en cause. Ainsi, dans une recherche centrée sur le rôle des connaissances en optique géométrique dans l'élaboration d'une explication d'ombres colorées, les auteurs (Olivieri et al. 1988) considèrent comme seuls pertinents les domaines de connaissance de l'optique géométrique et de l'optique physique. Cependant, la réponse à la question *« pourquoi les lumières rouge et verte produisent-elles une couleur jaune quand elles sont superposées ? »* relève, pour les auteurs, de l'optique physique alors qu'elle fait appel à des connaissances concernant la vision des couleurs.

Par ailleurs, ces auteurs notent, chez les adultes interrogés, scientifiques ou non, que l'expérience du mélange des couleurs en peinture peut agir comme un obstacle à la compréhension du mélange de lumières colorées. Ce point, qui sera développé dans l'enquête préliminaire (chapitre 1), met aussi en évidence la difficulté d'établir une cohérence entre les différents domaines.

1.3.3. Récapitulation

|| En conclusion, selon la plupart des recherches, on peut s'attendre
|| à trouver, chez nos élèves, des résistances liées à l'idée commune de

couleur comme caractéristique ou attribut d'objet, des difficultés traduisant l'absence de prise en compte des phénomènes de diffusion de la lumière par les objets éclairés et le manque de connaissances sur les lois de la vision et le fonctionnement du système visuel.

1.4. Effets possibles d'enseignements antérieurs dans le cursus secondaire sur les idées des élèves à propos de la couleur

Les étudiants d'arts appliqués sont majoritairement titulaires d'un baccalauréat de l'enseignement général section A3. On peut s'interroger sur les idées qu'ils se sont forgées, probablement, lors d'un enseignement de sciences physiques, en cherchant leurs sources dans les textes mis à la disposition des élèves et/ou utilisés par les enseignants des sections littéraires. Nous examinerons également des textes destinés à des élèves scientifiques.

1.4.1. Un manuel destiné aux sections littéraires ou artistiques

Nous choisissons d'analyser ici un ouvrage de chez Hachette⁵, très largement utilisé et bien documenté sur l'ensemble des thèmes du programme, et que nous avons pratiqué avec les élèves de ces sections.

La couleur y est abordée à propos du thème : « Spectroscopie, analyse spectrale » comme dans les ouvrages destinés aux sections scientifiques. Les expressions en italique sont extraites du manuel. Dans la suite nous analysons, éventuellement nous mentionnons simplement, les notions dans l'ordre où elles apparaissent.

1. Lumière et couleur

« § 6.1. Expériences de dispersion de la lumière : spectres

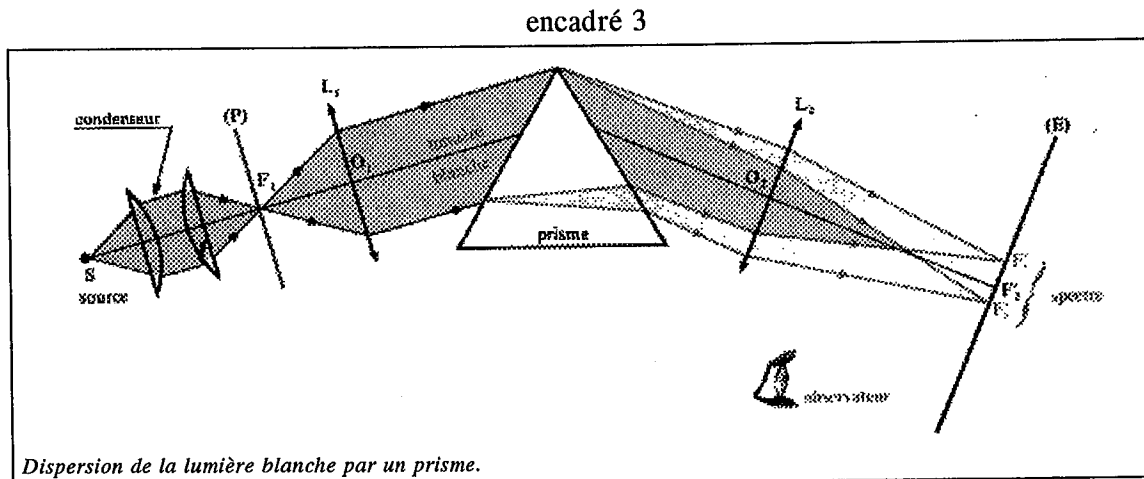
Dispersion de la lumière blanche par un prisme. »

On relève dans ce paragraphe une inflation de termes scientifiques compliqués :

- la mise en évidence de couleurs est introduite par l'expérience de dispersion de la lumière blanche par un prisme et s'accompagne d'un schéma décrivant une expérience complexe (voir encadré 3) ;
- les explications nécessitent de la part de l'élève des connaissances d'optique géométrique (réfraction, formation d'images par des lentilles) ;
- une deuxième expérience avec un réseau donne l'occasion d'y ajouter la diffraction, autre phénomène inconnu des élèves.

5. Fontaine, G., Magna, J.Y., 1982, Sciences physiques 1res A et B, Hachette, Paris.

Cet ouvrage peut paraître ancien, mais les éditions 88 et 89 des cours de physique destinées aux élèves de 1res S et E et de Terminale C et E du même éditeur reprennent la même structure, tout en étant moins détaillées.



Ces protocoles expérimentaux complexes, nécessitant préparation et réglages minutieux sont des expériences de démonstration que le professeur réalise devant des élèves passifs.

Quel sens le mot « couleur » prend-il, à travers cette introduction ?

Bien que ce mot apparaisse pour la première fois en même temps que la mention d'un observateur :

« on observe à la sortie un ensemble de faisceaux diversement colorés... » (§ 6.1.1.),

la suite de la phrase « la couleur la moins déviée est le rouge » suggère qu'il s'agit d'une caractéristique de la lumière. L'observateur figure en effet sur le schéma associé, ainsi que la lumière qui se propage jusqu'à l'écran, et s'y s'arrête. Un tel schéma indique un double statut pour la lumière : objet d'expérience jusqu'à l'écran, elle est figurée sur le schéma ; elle ne l'est plus, lorsqu'elle est médiateur pour expliquer ce que voit l'observateur sur l'écran.

Dans ce premier paragraphe, rien ne permet de comprendre que la couleur est perçue par l'observateur lorsqu'il reçoit de la lumière. La couleur apparaît d'abord comme une caractéristique de la lumière ou des radiations, ce qui est confirmé par l'étude des spectres d'émission :

« on assiste à la naissance progressive des radiations jaune, verte... »

et par la question posée au paragraphe suivant :

« § 6.2. Quelle grandeur physique associer à la couleur de la lumière ? »

2. Couleur et grandeur associée

La réponse à cette question est précédée, d'une part, d'une explication de ce qu'est la longueur d'onde en référence à la propagation d'une onde sur une corde (domaine qui comporte des difficultés spécifiques (Maurines 1986)), et d'autre part, de l'affirmation de la nature ondulatoire de la lumière. La voici :

« Les rayons lumineux sont des ondes qui dans le vide ou dans l'air se propagent, quelle que soit leur couleur, à la célérité c [...]. La longueur d'onde d'une radiation rouge n'est pas la même que celle d'une radiation bleue. »

Les ondes sont donc caractérisées par leur longueur d'onde (ou leur fréquence) et cette grandeur mesurable est associée terme à terme à une couleur dans un « *Tableau sommaire de correspondance couleur-longueur d'onde* » (Encadré 4).

Encadré 4

Longueur d'onde λ (μm)	couleur
0,40	violet
0,45	indigo
0,50	bleu
0,53	vert
0,58	jaune
0,60	orangé
0,65	rouge moyen
0,75	rouge extrême

Cette correspondance terme à terme entre longueur d'onde et couleur risque fort, chez le lecteur, de renforcer l'idée que cette correspondance est réciproque (à une couleur correspondrait une longueur d'onde), un principe d'économie conduisant facilement à l'**association biunivoque : couleur \Leftrightarrow longueur d'onde**.

3. Couleur des corps

« § 6.3.1. Recomposition de la lumière blanche : couleurs complémentaires »

Sur la base des expériences de Newton, à nouveau décrites, le lecteur est ramené à l'observation :

« Empêchons maintenant l'une des couleurs de traverser le plan P, [...] qu'on arrête le rouge et l'image A'B' paraît verte [...]. Ainsi les teintes complexes : rouge et vert, [...] associées par couples convenablement dosés permettent-elles de recréer la lumière blanche : ces teintes sont appelées teintes complémentaires. Leur juxtaposition satisfait d'ailleurs nos besoins esthétiques. » (ibid. p. 89)

On notera, dans ce paragraphe relatif à la couleur des corps, un changement dans le vocabulaire utilisé. D'abord qualificatif de la lumière (radiations colorées dans le paragraphe précédent), la couleur est manipulée pour elle-même (*le rouge*), puis ce terme est remplacé par celui de *teinte*, lorsqu'une bande de radiations caractérisées par un ensemble de longueurs d'onde intervient. Associée à l'idée de *complexité*, la teinte semble la couleur obtenue dans le cas d'une lumière non caractérisée par une longueur d'onde unique.

Ce glissement vers un terme qui désigne l'une des caractéristiques perceptives de la couleur suit un premier appel à la sensation éprouvée par le lecteur (*l'image A'B' paraît...*). Comment satisfaire les besoins esthétiques de l'observateur, si ce n'est par la vision et la perception, maillons dont il n'a pourtant jamais été question et qui restent non reliés à la composition de la lumière reçue par l'observateur ?

« § 6.3.2. *Couleur des corps par transmission*

« *toutes ces solutions ont la couleur de la lumière qu'elles transmettent, c'est-à-dire la couleur qui résulte de la superposition des radiations non absorbées* » et plus loin « *vous observez que la teinte de la lumière transmise est complémentaire de la couleur absente* ».

La couleur de la bande d'absorption qui sert à caractériser la substance du point de vue du physicien et du chimiste, est absente et complémentaire de la couleur transmise. Il reste un travail important à faire à l'élève, qui n'est pas aidé autrement que par un tableau à mémoriser : « *couleur perçue / couleur absorbée* ».

On notera toutefois dans ce paragraphe la première apparition de la « sensation » :

« *la sensation de vert produite par la chlorophylle sur l'oeil est due à une lumière transmise très complexe* ».

Mais l'idée qu'une lumière complexe produit une sensation unique reste ici considérée comme cas particulier et n'apparaît pas comme une loi générale du fonctionnement de la vision.

« § 6.3.3. *Couleur des corps par réflexion* »

« § 6.3.4. *Couleur des corps par diffusion* »

Les auteurs choisissent l'exemple des métaux colorés et y ajoutent le cas des métaux en feuille suffisamment mince pour être transparente. Ce n'est pas la situation la plus courante de corps colorés. De plus, un métal poli réfléchit la lumière suivant les lois de Descartes (réflexion régulière ou spéculaire) et le lecteur peut privilégier cet aspect du comportement d'un métal plus souvent étudié que celui de réflexion diffuse ou diffusion de la lumière dans toutes les directions.

Le phénomène de diffusion par les corps opaques est totalement absent de l'exposé, puisque la couleur des corps par diffusion n'est citée qu'à propos du cas particulier de la diffusion moléculaire (diffusion de Rayleigh) pour expliquer le bleu du ciel.

4. *Synthèse des couleurs*

« § 6.3.5. *Synthèse des couleurs : trichromie*

« *Toutes les nuances de couleurs auxquelles l'oeil est sensible, peuvent être reproduites par superposition de trois couleurs de base : le rouge, le jaune et le bleu, convenablement dosés* ».

Ce paragraphe introduit l'idée de trichromie pour produire une gamme étendue de couleurs et le récepteur sensible de l'oeil est cité : « *la rétine* ». Mais y a-t-il des couleurs auxquelles l'oeil ne soit pas sensible ? En accord avec le point de vue développé plus haut où couleur et longueur d'onde sont confondues, sans doute pense-t-on aux radiations des domaines ultraviolet et infrarouge comme à des couleurs invisibles ?

Quant à la synthèse des couleurs, les remarques suivantes s'imposent. D'une part, s'il s'agit de synthèse additive[☆], les couleurs de base citées sont fausses (en télévision couleur les lumières sont émises dans les bandes rouge, verte et bleue), et aucune relation n'est faite avec ce qui a été le point de vue précédent, en précisant par exemple le domaine de longueurs d'onde. D'autre part, la référence aux procédés de synthèse soustractive[☆], à l'imprimerie et à la reproduction d'une photographie en couleur, est illustrée par quatre clichés en couleur. Le commentaire du texte, « *La figure résulte de la superposition des trois clichés rouge, jaune et bleu que vous voyez à côté* » et la légende des clichés, « *les trois passages aux encres cyan, magenta et jaune* », comportent des indications contradictoires. Comment le lecteur peut-il s'y retrouver ?

Si la notion de trichromie s'applique aux deux procédés, les couleurs de base dans les deux cas diffèrent, ce qui n'apparaît pas dans le texte.

5. Vision et perception

« § 6.3.6. Les effets physiologiques »

Le rôle du système visuel qui n'a pratiquement pas été analysé dans les paragraphes précédents n'est traité que par le biais d'une anomalie de la vision des couleurs, le daltonisme. On signale à ce propos que « *l'oeil normal possède trois types de récepteurs rétiniens sensibles aux trois couleurs de base* ».

Sont cités rapidement, à titre de curiosités, deux effets perceptifs (contraste simultané[☆] et effet Musatti) présentés comme des illusions que l'on ne peut expliquer.

1.4.2. Exemples des manuels destinés aux élèves des sections scientifiques

Pas plus que pour les sections artistiques, le terme « couleur » ne figure dans l'intitulé officiel des programmes de physique destinés aux élèves des sections scientifiques avant 1993. Mais les phénomènes de couleur sont évoqués dans tous les ouvrages à propos de la lumière.

Les ouvrages disponibles sont très voisins de ce point de vue. Les énoncés principaux qui introduisent la couleur sont les suivants :

1. Couleur et grandeur associée

En classe de première, le caractère ondulatoire de la lumière est simplement affirmé, selon l'énoncé 1 :

« *la lumière est une onde électromagnétique* » (Nathan⁶ p. 295),

ou introduit à titre d'hypothèse et vérifié par l'analogie du phénomène de diffraction d'une lumière monochromatique avec la diffraction d'une onde mécanique (Hachette⁷).

L'**observation** du spectre de la lumière blanche, soit dans l'arc-en-ciel, soit obtenu par dispersion de la lumière blanche avec un prisme, permet l'énoncé 2 :

« *La lumière blanche est un ensemble d'ondes lumineuses caractérisées par leurs fréquences / ou leurs longueurs d'onde* »,

suivi de l'énoncé 3

« *A chaque valeur de la longueur d'onde correspond une couleur particulière de la lumière* » (Nathan) ;

On attend de l'élève qu'il mémorise la connaissance suivante (énoncé 4) :

« *les ondes lumineuses sont comprises entre 400 nm (pour le violet) et 750 nm (pour le rouge)* » (Hatier⁸).

Il y est aidé par un tableau de correspondance entre fréquences et/ou longueurs d'onde et couleurs intitulé : « *Couleurs et fréquences des ondes lumineuses* » (Hachette)

La définition d'une lumière monochromatique vient après l'observation du spectre de raie du sodium et l'évocation de la lumière laser. Une telle lumière peut également être obtenue à partir de la lumière blanche à l'aide d'un filtre coloré (Hatier, Nathan), mais une seule remarque prévient le lecteur d'une difficulté :

« *La lumière obtenue n'est pas rigoureusement monochromatique, car un filtre, même d'excellente qualité laisse passer des ondes de longueurs d'onde proches, mais distinctes* » (Nathan).

De ces énoncés, il ressort que la couleur est une caractéristique de la lumière, associée de façon biunivoque à une valeur de longueur d'onde.

2. Couleurs complémentaires

En classe terminale, en s'appuyant sur les connaissances des classes antérieures, les expériences de dispersion de la lumière par un prisme et de diffraction par un réseau sont reprises plus en détail. A ce propos, l'expérience de recombinaison de la lumière blanche est fréquemment décrite et permet l'introduction de la notion de couleurs complémentaires.

6. Fontaine G., Lautrette M., Tomasino A. (1988), *Physique 1 SE*, Ed. Nathan, Paris.

7. Bramand P., Faye Ph., Thomassier G. (1988), *Physique 1 SE*, Hachette, Paris.

8. Degurse A.M., Gozard F., Rozenfeld-Gipch L., Soulié L. (1988) *Physique 1 SE*, Hatier, Paris.

Chez Hachette⁹, après une description de l'expérience en termes de radiations, on note un changement dans le registre du vocabulaire utilisé, où seuls sont repris les termes de teinte :

« on dit que le cyan est la couleur complémentaire du rouge »,

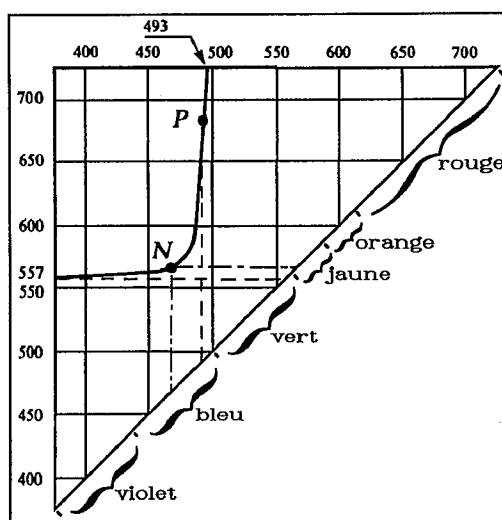
l'expression « lumières colorées » n'est pas davantage reprise dans la définition :

« Deux couleurs sont dites complémentaires, quand agissant simultanément sur un oeil normal, elles lui donnent l'impression d'une couleur blanche ».

Si la mention de l'oeil est faite, l'idée du médiateur qu'est la lumière entre l'écran (ici) et l'oeil n'est pas suggérée, pas plus que l'existence de lois générales des mécanismes de la vision. Lorsque les couleurs ne sont pas dues exclusivement à des radiations monochromatiques, il devient difficile de distinguer ce qui relève de la vision et ce qui relève du domaine culturel :

« il existe en fait une infinité de tels couples, associés à des couleurs que nos coutumes (arbitraires) considèrent comme simples ou comme complexes » (Hachette, ibid. p. 310).

Encadré 5



L'illustration¹⁰ (encadré 5) suggère encore ici qu'aux couples de couleurs complémentaires sont associés des couples de radiations monochromatiques. A ce choix de simplification, s'ajoute une notion d'arbitraire dans la définition des couleurs complémentaires.

9. Bramand P., Durandeau J.P., Faye Ph, Thomassier G. (1989), *Physique Terminales C et E*, Hachette, Paris.

10. Ce diagramme correspond à des mesures faites par Helmholtz et reprises par Fleury Mathieu (1965.)

3. Synthèse des couleurs

D'autres ouvrages (Nathan¹¹ et Hatier¹²) développent l'aspect technique de la synthèse des couleurs et accompagnent le texte de schémas classiques où figurent les teintes des couleurs primaires de chaque cas. De la légende, associée au schéma classique relatif à la synthèse additive[☆], disparaissent la mention de la lumière : « *le vert et le rouge donnent le jaune...* » (Nathan) et les précisions sur les conditions d'observation.

A propos de la synthèse soustractive[☆], le commentaire « *la superposition de trois filtres absorbant le jaune, le cyan et le magenta conduit au noir* » (Nathan) est associé à un schéma qui ne correspond pas aux filtres décrits : un filtre jaune n'absorbe pas les « radiations jaunes¹³ ».

Ici encore une fausse simplification, « *Si plus de cinq radiations manquent dans le spectre de la lumière blanche, l'oeil a la sensation de gris* » (Hatier, p. 311), n'apporte aucun élément sur le fonctionnement de la vision et la sensation de couleur n'est évoquée que dans le cas de la superposition de plusieurs radiations.

1.4.3. Récapitulation

En conclusion, les éléments d'analyse de l'enseignement traditionnel (jusqu'en 1993) rassemblés ci-dessus laissent penser que les élèves, aussi bien littéraires que scientifiques, risquent :

- d'associer abusivement couleur et longueur d'onde,
- d'être incapable d'analyser le rôle de l'oeil et le fonctionnement de la vision,
- de ne disposer d'aucun moyen pour expliquer les techniques de production de couleur et les situations de couleur les plus fréquentes dans la vie courante.

En effet, dans les textes scolaires analysés, la couleur est seulement un moyen pour faire passer l'idée de la nature ondulatoire de la lumière. Ce point de vue des physiciens, objectif assigné aux sections scientifiques, n'est pas remis en cause pour des élèves à vocation non scientifique.

Dans l'enseignement secondaire actuel, la couleur est classiquement introduite à partir d'une réplique de l'expérience de Newton. Destinée à fonder la théorie ondulatoire de la lumière, cette expérience apparaît comme un objet d'apprentissage incontournable. Le concept de couleur qui en découle, celui d'une caractéristique

11 Fontaine G., Lautrette M., Tomasino A. (1989), *Physique T C et E*, Ed. Nathan, Paris.

12. Degurse A.M., Gozard F., Rozenfeld-Gipch L., Soulié L., Zemb T. (1989), *Physique Classe de Terminales C/E*, Hatier, Paris.

13. En photographie, par exemple, un filtre "ultraviolet" absorbe les radiations ultraviolettes.

attribuée à la lumière, ne permet pas facilement ensuite de cibler les outils conceptuels nécessaires à une maîtrise des techniques et de leur trouver une cohérence avec ceux de la physique.

1.5. Un autre concept de couleur à retenir pour une séquence d'enseignement

Une transformation du contenu de l'enseignement relatif à la couleur nous est apparu nécessaire aussi bien sur le plan de la cohérence conceptuelle que de la maîtrise des techniques actuelles. En cela la démarche qui inspire la définition des objectifs de notre séquence rejoint celle qui a guidé l'évolution historique des « savoirs savants », marquée par la recherche d'un langage et de concepts communs aux différents domaines d'approche des phénomènes de couleur.

Nous choisissons de présenter la couleur comme « réponse perceptive à la lumière », tout en associant cette réponse à la composition spectrale. Ce point de vue nous semble le seul susceptible de présenter d'une façon unifiée les différentes techniques de production de couleur, puisque, dans tous les cas, celles-ci mettent en jeu la lumière. Les différences portent sur les moyens de production, et d'ajustement dans cette lumière, des proportions de lumières colorées.

D'autre part, restituer à la vision et à la perception des couleurs par l'observateur un statut de connaissance scientifique et en dégager les lois générales permet de déplacer les limites de la subjectivité. Cette place fondamentale accordée à l'observateur, celle de « voyant » des couleurs, ne risque pas d'entraver la créativité demandée aux étudiants dans les disciplines artistiques, ni de susciter des contradictions avec des points de vue relevant d'autres domaines.

Ce choix peut être considéré comme plus abstrait que les associations classiques couleur-matière ou couleur-lumière, et nous sommes conscients que ce concept n'est pas naturel pour les étudiants (voir paragraphe 1.3.), mais c'est le seul qui soit véritablement unificateur.

Il reste à évaluer si un tel choix, centré sur une cohérence unificatrice, peut favoriser, chez les étudiants, une mobilité et une disponibilité d'outils conceptuels d'un domaine à l'autre, ou si, au contraire, une telle approche crée plus de difficultés qu'elle n'en résout.

2. LA RECHERCHE : PROBLEMATIQUE ET METHODES

2.1. Une séquence d'enseignement

L'objectif pédagogique de ce travail est de mettre en cohérence des connaissances relevant de cadres disciplinaires habituellement disjoints comme la physique, les techniques, ou la psychologie de la perception, et d'augmenter ainsi la disponibilité des outils conceptuels pour comprendre les phénomènes de couleur.

Une fois assigné le but à un enseignement donné, il reste, d'un point de vue de chercheur, à définir quelles connaissances nouvelles peuvent être disponibles à la suite d'un travail dont le cadre est l'élaboration et la mise en oeuvre d'une séquence appropriée.

Nous nous proposons de contribuer à cette élaboration de connaissances didactiques à des niveaux et selon des modalités différents.

2.2. Un ensemble de choix, des évaluations globales « interne » et « externe »

D'abord, bien entendu, nous décrivons les principes de base qui sous-tendent l'élaboration de la séquence dans son ensemble. L'un de ces principes a été énoncé dès le début de cette introduction et le point fait sur l'état de l'enseignement actuel montre que ce principe en est absent. Il consiste à faire le pari qu'une **approche intégrée** de la couleur est possible et fructueuse au sens où elle permet d'établir une cohérence entre les différents domaines.

Les autres principes sont associés à la façon dont les étudiants sont **mis en activité**, dans l'élaboration de leurs connaissances, dans l'optique d'un constructivisme associé à des guidages importants. Ils seront détaillés dans le chapitre 2, consacré à la description de la séquence.

D'emblée, la pluralité de ces principes interdit qu'on prétende les mettre individuellement à l'épreuve des faits. C'est donc un ensemble de choix didactiques dont l'effet sur les étudiants, en fin de séquence, sera évalué.

L'idée d'évaluation est à la fois plus banale et plus modeste que celle de « validation ». S'agissant d'un ensemble de choix, il nous semble préférable de ne pas suggérer que nous validons telle ou telle hypothèse individuelle. En revanche, la banalité du terme ne doit pas laisser penser qu'il s'agit d'une évaluation unidimensionnelle, à forte connotation normative.

Nous n'entendons pas démontrer que cette séquence « réussit mieux » ou « ne réussit pas mieux » qu'une autre. L'effet global de la séquence est évalué de manière pluridimensionnelle, comme nous le verrons, à l'aide d'un ensemble d'informations que nous appelons « *profil conceptuel de groupe* ».

L'outil utilisé pour cette évaluation globale, en termes de profil conceptuel, est en soi un produit de cette recherche.

L'idée qui a présidé à sa constitution est qu'on ne peut parler d'un « état conceptuel » d'étudiant in abstracto, indépendamment de la question qui est posée à celui-ci. En ce sens, il est discutable de dire : « L'étudiant pense que la couleur, c'est ceci ou cela ». Cette idée oriente déjà les descriptions de raisonnements communs d'étudiants qui font une large place aux questions posées (Viennot 1977, Saltiel 1978, Fauconnet 1981, Closset 1985). Elle se retrouve dans la proposition d'E. Mortimer (1993) qui définit également un profil conceptuel pour l'évaluation individuelle des élèves après une séquence d'enseignement sur la constitution de la matière.

Elle conduit à recueillir des éléments d'informations non pas seulement sur tel ou tel type de réponses, mais plutôt sur des ensembles question-élément de réponse. Afin que la multidimensionnalité ne dégénère pas en ingérabilité, il faut bien entendu faire des choix. Ceux-ci sont faits en particulier compte tenu de la question qui est posée au début de ce chapitre : les connaissances sur la couleur restent-elles adhérentes à un domaine particulier, ou se traduisent-elles par une efficacité équivalente en tous domaines ? Ou encore, une aptitude manifeste au niveau du discours sur la couleur va-t-elle de pair avec des possibilités de résolution de problèmes techniques ?

Les couples question-élément de réponse retenus pour les évaluations de profil conceptuel ont été également largement déterminés par des informations recueillies à la fois au cours de l'enquête préliminaire à la séquence et au cours de la séquence elle-même.

Nous avons choisi de nous intéresser aux profils conceptuels de groupes, où un taux d'apparition correspond à chaque couple question-élément de réponse. Nous cherchons à savoir si la séquence se traduit à la fin par un profil conceptuel de groupe caractérisé.

L'objectif de l'enseignement est d'autant mieux atteint, selon ce moyen d'évaluation, que les couples question-élément de réponse correct (respectivement : incorrect) sont associés à des taux élevés (respectivement : bas) sur un ensemble large de questions.

Pour autant nous ne nous interdisons pas, bien au contraire, des comparaisons avec des groupes témoins. Il nous semble en effet important de soumettre une entreprise d'enseignement à des comparaisons avec ce qui peut se faire par ailleurs avec des conditions aux limites semblables (types d'étudiants, programmes, contraintes institutionnelles, horaires, conditions matérielles) et des objectifs pour une part identiques.

Notre souci est que l'aspect pluridimensionnel de ces comparaisons puisse mettre en évidence le caractère de disponibilité de connaissances acquises, en même temps qu'un aspect plus particulièrement centré sur la séquence elle-même, celui de structuration de ces connaissances.

Enfin il faut noter que l'évaluation externe se fait un an après enseignement, et porte donc sur les acquis à relativement long terme. Il n'est pas interdit de penser, en effet, que vision cohérente et acquis à long terme vont de pair.

2.3. Analyse détaillée de la mise en oeuvre de la séquence : « carnet de notes »

Dans la logique de ce travail, antérieurement à l'évaluation finale, nous disposons d'informations de détail sur la mise en oeuvre de la séquence. Celles-ci prennent des formes diverses : types de prévisions devant un dispositif expérimental, remarques d'élèves notées par le professeur, documents de synthèse et schémas élaborés par les élèves, réponses et commentaires écrits¹⁴ à des questionnaires.

Nous sommes là dans une perspective proche de l'ingénierie des didacticiens des mathématiques (Artigue 1989), où l'on attend d'une situation spécifique d'enseignement des effets bien particuliers, dont on regarde s'ils se produisent ou non. Nous n'avons pas adopté leur format d'exposition en termes d'analyses *a priori* et *a posteriori*, pour concentrer notre rédaction. Mais si nous n'avions tenu qu'à valider des hypothèses, cette démarche-là eut été plus propice que notre premier niveau d'évaluation globale.

Cette analyse détaillée fait apparaître, comme nous le verrons, les blocages, les difficultés, les procédures fructueuses ou semi fructueuses, les manifestations d'engagement actif dans la recherche de cohérence. Elle suggère aussi des réorientations dans les activités proposées ou la formulation des questions présentées à la discussion. Elle contribue finalement, de manière décisive, à construire l'outil de détermination d'un profil conceptuel que nous proposons pour la couleur.

14. Pour des enseignements de longue durée portant sur dix groupes répartis sur deux ans, il ne nous a pas été possible d'utiliser des enregistrements audio ou vidéo.

3. PLAN DE LA THESE

Une enquête préliminaire (chapitre 1) contribue à situer plus précisément les caractéristiques sociologiques du public et ses connaissances sur les questions de couleur au début de la séquence. Outre les réponses à un questionnaire, ce chapitre analyse quelques entretiens qui donnent des indications sur les difficultés et les réactions des étudiants devant des situations expérimentales. Le caractère extrêmement mobilisateur de deux de ces situations est alors dégagé.

Le chapitre 2 décrit les principes et la structure de détail d'une séquence d'enseignement prévue pour quinze heures environ.

On trouve au chapitre 3 (carnet de notes) une analyse du fonctionnement de la séquence à travers quelques points critiques et des indications sur l'attitude d'ensemble des étudiants à son égard.

Le chapitre 4 comporte des éléments d'évaluation sur les acquis conceptuels des étudiants en fin de séquence, à travers deux comparaisons :

- l'une, interne, compare les réponses des étudiants à des questions analogues, avant et après la séquence ;
- l'autre, externe, compare les réponses à des questions identiques d'étudiants de trois groupes ayant tous suivi un enseignement sur la couleur l'année précédente. Parmi eux, deux groupes ont suivi un enseignement traditionnel tandis qu'un groupe a suivi la séquence. Les étudiants impliqués dans cette évaluation externe ont reçu l'enseignement un an avant leurs camarades de l'évaluation interne.

Pour ces deux types de comparaison, on centre l'analyse sur les profils conceptuels de groupes évoqués plus haut (chapitre 5).

Une conclusion récapitule les acquis de ce travail.

CHAPITRE 1

ENQUETE PRELIMINAIRE : LES ETUDIANTS D'ARTS APPLIQUES ET LA COULEUR

La séquence d'enseignement que l'on se propose de mettre en place et d'expérimenter est destinée à des étudiants d'arts appliqués. Une connaissance de ce public particulier est un préalable à la recherche, ce qui nous a amené à procéder à une enquête préliminaire. L'enquête comporte deux volets. L'un, de type sociologique, porte sur des élèves d'arts appliqués, leur formation antérieure, et l'autre, sur leurs connaissances et modes de raisonnement relatifs à la couleur.

1. LES ETUDIANTS D'ARTS APPLIQUES : LEURS PARCOURS ANTERIEURS, LES CADRES D'ENSEIGNEMENTS REÇUS SUR LA COULEUR

1.1. Des origines diverses, souvent compensées par une « mise à niveau »

Les étudiants entrant en section de technicien supérieur d'arts appliqués viennent, pour l'essentiel, soit d'un baccalauréat F12 (arts appliqués), soit d'un brevet de technicien (B.T. de dessinateur maquettiste, arts graphiques, volumes architecturaux), soit d'autres formations suivies d'une année de mise à niveau (« MàN »). On s'intéresse surtout, dans la suite de l'étude, aux sections de « Plasticiens de l'environnement architectural ».

Le tableau suivant indique, pour deux promotions successives de Plasticiens, combien d'étudiants ont suivi cette mise à niveau et combien sont entrés directement à l'issue d'un baccalauréat F12 ou d'un brevet de technicien.

Origines des étudiants en section de technicien supérieur « Plasticien »

	Plasticiens 91-92 N = 22	Plasticiens 92-93 N = 23
provenant d'une classe de mise à niveau	7	12
possédant un bac F 12	9	5
possédant un BT	6	6

On peut considérer que, selon les années, entre un tiers et une moitié des étudiants sont passés par une classe de mise à niveau.

Ces classes « MàN » s'adressent elles-mêmes principalement à des titulaires d'un baccalauréat d'enseignement général (83 %, voir tableau ci-dessous pour une promotion 1990-1991), la moitié des étudiants l'ayant obtenu dans l'option d'arts plastiques A3. Les autres étudiants de ces classes ont soit un baccalauréat professionnel, soit un brevet de technicien (B.T. déjà cités).

Un groupe d'étudiants occupe une place particulière dans la suite de cette enquête pour une raison conjoncturelle : 60 élèves de cette classe se sont trouvés réunis dans un stage intensif d'arts plastiques en milieu rural et marin à St Rémy (des Landes), en fin d'année scolaire 1990-1991. Ce groupe est désigné dans la suite, et dans la deuxième ligne des deux tableaux suivants, par « MÀN St Rémy ».

Répartition des élèves de Mise à Niveau selon les types de bac

	BAC A3	A1/A2/B/C/D	Bac PRO/BT	Autres
MÀN 90-91 (N = 84)	51 % 43	32 % 27	10 % 8	7 % 6
MÀN St Rémy (N = 60)	45 % 27	22 % 13	13 % 8	20 % 12

Les élèves de mise à niveau n'entrent pas toujours directement dans ces classes, en réussissant le concours d'entrée l'année de leur bac. Comme le montre le tableau ci-dessous, la moitié d'entre eux le préparent en suivant une formation complémentaire pendant un an. C'est ce qui explique que, pour certains, les enseignements reçus au lycée, en première particulièrement, semblent lointains.

Situation par rapport au Bac

situation par rapport au Bac	Bac	Bac + 1
MÀN 91(N = 84)	54 % (45)	46 % (39)
MÀN St Rémy (N = 60)	50% (30)	50% (30)

Les premiers éléments de l'enquête qui concerne le groupe « Mise à niveau St-Rémy », consignés dans les deux tableaux précédents, permettent de vérifier que les parcours scolaires de ce groupe restreint sont globalement analogues à ceux de l'ensemble de la promotion « MÀN 1990-1991 ».

Compte tenu de la diversité des voies d'accès aux sections de techniciens supérieurs, on peut s'interroger sur le caractère représentatif d'un groupe qui ne concerne que l'une d'entre elle (MÀN), elle-même alimentée de public variés. Mais précisément cette voie a pour fonction d'assurer à tous une base commune, considérée comme nécessaire et suffisante au suivi d'une section de Technicien Supérieur. Ceux qui sautent cette étape sont considérés comme disposant déjà de cette base.

En ce sens, les élèves de mise à niveau devraient, en fin d'année, révéler des éléments de formation relativement communs à l'ensemble d'une promotion abordant l'enseignement qui fait l'objet de cette recherche.

1.2. Cadre disciplinaire des enseignements reçus sur la couleur

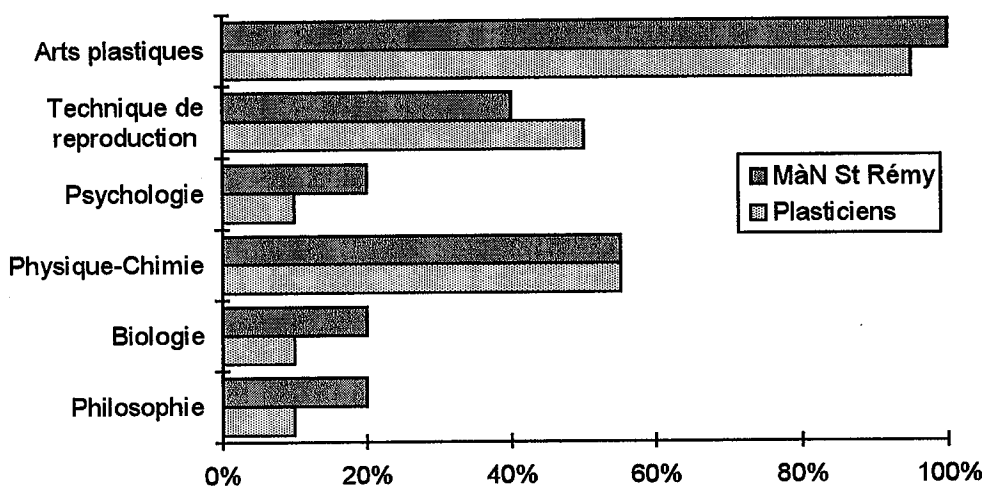
1.2.1. Les groupes

Les informations recueillies sur les enseignements reçus concernent deux groupes : celui que l'on vient de décrire, « MÀN St Rémy », et un groupe d'étudiants de section « Plasticiens » en tout début d'année 1991-1992.

1.2.2. La question et les résultats

Pourcentages des réponses positives →	MàN St Rémy	Plasticiens 91-92
Q2. Avez-vous reçu des informations sur la couleur au cours de vos études ?	oui 95 %	oui 100 %
Q3. Précisez le cadre disciplinaire :		
Arts plastiques	100 %	95 %
Techniques de reproduction (photo, vidéo, impression)	40 %	50 %
Psychologie	21 %	10 %
Physique-Chimie	55 %	55 %
Biologie	18 %	10 %
Philosophie	21 %	10 %

Les cadres d'enseignement de la couleur



1.2.3. Points marquants

Pratiquement tous les élèves déclarent avoir reçu une information sur la couleur au cours de leurs études et précisent les cadres disciplinaires où ces informations leur ont été données. La quasi-totalité a reçu une information dans le cours d'arts plastiques, mais également 55 % d'entre eux déclarent l'avoir eue dans le cours de physique et plus de 40 % à propos des techniques (photo, vidéo ou impression).

Il reste à voir par quels types de connaissances et de modes de raisonnement ces formations se sont traduites. C'est l'objet du second volet de notre enquête préliminaire, qui concerne exclusivement le groupe MàN St Rémy. Cette partie de l'enquête s'est déroulée en deux temps : un questionnaire sur le thème de la couleur auquel les étudiants ont répondu en une heure environ, et une proposition d'un atelier sur le sujet, avec manipulations suivies d'entretiens, par groupes de deux ou trois, sur la base du volontariat.

2. LE QUESTIONNAIRE SUR LES CONNAISSANCES ET MODES DE RAISONNEMENT AVANT ENSEIGNEMENT

L'idée qui a présidé à la construction de ce questionnaire (voir annexe 1, questionnaire St-Rémy) est celle d'un balayage large, portant sur des aspects de la couleur associés à des techniques (caractériser des couleurs, synthèses), à la physique (arc-en-ciel), à la perception (vision nocturne).

Une lecture rapide de ce qui suit peut se faire en allant directement de l'énoncé de chaque question ou groupe de questions au paragraphe le plus proche indiquant les points marquants.

2.1. Nommer les couleurs et les caractériser

Les questions suivantes portent sur des situations se rapportant aux techniques de création ou de reproduction de couleurs abordées par les étudiants, dans le cadre de leur formation en arts plastiques ou arts appliqués. Une photocopie couleur est présentée aux étudiants. Elle comporte 20 couleurs dont deux seulement sont proches des couleurs primaires du peintre (jaune et bleu-cyan). 7 plages sont obtenues par superposition de deux filtres transparents, et 8 plages, présentant donc des teintes beaucoup plus foncées, par superposition de 3 filtres ou plus. Les étudiants sont invités à répondre aux questions dans l'ordre.

La première de ces questions (la numérotation commence ici à 4, les premières questions portant sur le passé scolaire) nous a permis de recueillir des informations sur la dénomination des couleurs telle que la pratiquent les élèves, afin de rechercher si une organisation ou une structuration préside à la description de ce qu'ils perçoivent.

2.1.1. Les questions

Q4. Caractérisez le plus précisément possible les différentes couleurs observées. Numérotez les plages et indiquez la couleur correspondante sur le schéma ci-dessous (sans écrire sur la feuille en couleurs).

Q5.1. La photocopie précédente a été obtenue par superposition de triangles de même taille et de différentes couleurs. Donnez le nombre de triangles utilisés ainsi que leurs couleurs.

Cette question n'apparaît qu'au verso de la feuille remise aux étudiants, afin de ne pas influencer la réponse à la question précédente.

2.1.2. Les résultats

En ce qui concerne la question 4, il apparaît deux catégories de réponses.

1. Description des couleurs une par une

Ce type de réponses se réfère à l'expérience commune, la caractérisation de la couleur porte essentiellement sur la teinte décrite

- par les adjectifs du vocabulaire courant : rouge, vert, bleu,
- par une comparaison avec un matériau ou un objet habituellement de cette couleur (jaune citron, vert bouteille),
- par un nom ou par un label utilisé par les marchands de couleur (terre d'ombre).

Ce premier type de réponses est de très loin le plus fréquent. Apparaît ici la richesse du vocabulaire dans la dénomination des teintes des couleurs, qui est une caractéristique de notre population.

2. Description s'intégrant dans un ensemble organisé

Quelques réponses indiquent des précisions sur les caractéristiques de la couleur autres que la teinte, utilisant des adjectifs du langage commun relatifs à la saturation[☆] (*pâle*) ou à la luminosité (*clair, foncé*) ou aux deux à la fois (*sombre, vif*). Certaines couleurs sont qualifiées de couleurs *primaires ou secondaires*.

Moins de 10% des étudiants font référence explicitement dans leur réponse aux règles du mélange de peintures et les utilisent pour nommer la nouvelle teinte d'une plage correspondant à la superposition de deux filtres. Par exemple, ils additionnent les couleurs : « *rouge + vert = marron, rouge + jaune = orange, bleu + rouge = violet* ».

La question 5.1. annonce le montage à partir de filtres colorés. Retrouver la couleur des transparents utilisés n'a posé aucun problème aux élèves.

2.1.3. Points marquants

La question 4 (nommer les couleurs...) posée avant d'indiquer le mode d'obtention de la photocopie induit les réponses plage par plage. Les étudiants repèrent quelquefois la superposition de filtres, avant qu'elle ne soit évoquée à la question 5.

Cependant, quelques-uns seulement manifestent clairement qu'ils utilisent les règles de mélanges des pigments.

2.2. Procédés de création de couleurs

2.2.1. Les questions

Les deux questions suivantes visent à faire apparaître la façon dont les étudiants classent les méthodes de production de couleur qu'ils connaissent, en référence à la superposition de filtres de la question précédente.

1. Procédés utilisant la superposition de matières (synthèse soustractive[☆])

Q5.2. Pourriez-vous citer des domaines d'application où des couleurs sont obtenues par superposition de matières ?

2. Autres procédés (synthèse additive[☆]).

Q6. Connaissez-vous d'autres procédés de création de couleurs qui ne fassent pas appel à une superposition de matières ? Donnez des exemples.

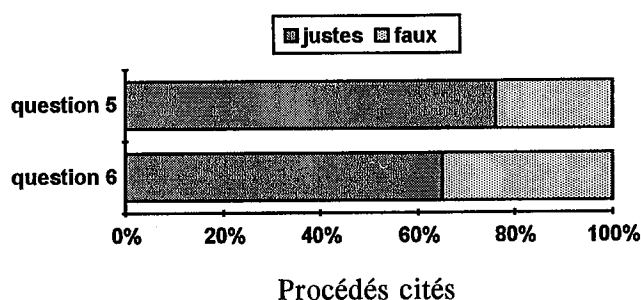
Cette question vise les cas où la couleur résulte de lumières colorées pénétrant simultanément dans l'oeil de l'observateur venant de points très rapprochés, de sources primaires ou diffusantes (procédés se référant à la synthèse additive ou au mélange optique).

2.2.2. Les réponses

Procédés (synthèses additive et soustractive)

Procédés cités	à juste titre	à tort
question 5 : 152 citations (synthèse soustractive)	116 Peinture, pastel, aquarelle, crayon, Imprimerie, gravure, sérigraphie, photocopie Impression textile, teinture, maquillage Photographie, cinéma	36 T.V., vidéo, images de synthèse, Eclairage Pointillisme, tissage
question 6 : 83 citations (synthèse additive)	54 Juxtaposition de matières, pointillisme, tissage, affiche, T.V., vidéo, DAO* Eclairage, laser, lumière	29 Cinéma et photo Matières colorées Autres

*Dessin assisté par ordinateur



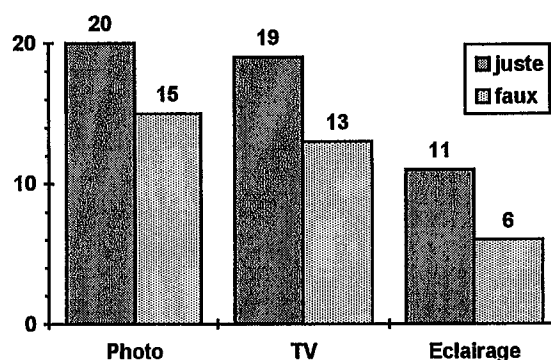
2.2.3. Comparaison des réponses aux deux questions

La comparaison des questions 5 et 6 suscite deux remarques. D'une part, en réponse à la question 5, 90% des étudiants citent au moins un exemple de procédés contre 10% qui ne donnent aucune réponse, tandis qu'à la question 6, faisant référence à l'addition de lumières, la proportion de non-réponses est de 20 %, soit le double par rapport à la question précédente (superposition ou mélange de matières). Les réponses nombreuses (152 mentions d'un procédé, question 5) et

un meilleur taux de réponses correctes montrent que les procédés qui mettent en jeu les mélanges de matières semblent inspirer davantage les élèves que ceux qui mettent en jeu les mélanges de lumière.

D'autre part, les deux questions mettent globalement en évidence une difficulté pour classer la photographie-couleur, les images obtenues sur les écrans de télévision ou les moniteurs et les éclairages, puisque ces techniques sont citées à juste titre et à tort avec des fréquences pratiquement voisines. Lorsque les étudiants citent ces procédés à la fois aux questions 5 et 6, 30% seulement des réponses sont correctes.

Procédés cités	question 5 superposition de matière	question 6 Autres
Photos, cinéma	20 (juste)	15 (faux)
T.V., vidéo, DAO	13 (faux)	19 (juste)
Eclairage	6 (faux)	11 (juste)



2.2.4. Points marquants

Ces questions 5.2. et 6 montrent que les élèves ont beaucoup de procédés techniques présents à l'esprit. L'idée de création de couleurs par superposition ou mélange de matières apparaît dominante, par l'abondance des procédés cités à juste titre à ce propos. Globalement, on note une mauvaise compréhension conduisant à ne pas situer les procédés mettant en jeu la lumière et les additions de lumière par rapport à ceux impliquant une utilisation de matières diffusantes.

2.3. Couleurs de l'arc-en-ciel

2.3.1. Question et taux de réponses

Q7. Toutes les couleurs sont-elles dans l'arc-en-ciel ?		
oui	non	sans réponse
40 %	55 %	5 %

Cette question vise à mettre en évidence la relation entre couleur et lumière, ce dernier domaine étant plus spécifiquement traité dans le cadre d'un cours de physique. Quelles traces a laissé l'expérience de décomposition de la lumière blanche par un prisme et son interprétation par la théorie ondulatoire de la lumière ?

2.3.2. Commentaires

Toutes les réponses sont accompagnées d'un commentaire, ce qui semble indiquer que la question n'a pas dérouté les élèves. Les arguments utilisés pour justifier les réponses peuvent être classés en référence à plusieurs conceptions.

Le critère essentiel retenu pour le classement des réponses est la présence du mot « lumière » ou une référence à la décomposition de la lumière pour observer les couleurs ; l'exactitude de la réponse brute, oui ou non (non est ici la réponse correcte attendue), a été considérée comme secondaire.

Dans le premier groupe de réponses (1.1., 1.2.), aucune référence à la lumière n'est présente. La couleur est « localisée » dans le ciel comme sur une « palette de couleurs ». L'observateur est hors de la réalité observée, il n'y a aucun médiateur entre le phénomène et l'observateur.

Dans le second groupe, les éléments relatifs à la lumière sont présents, soit par une réponse « oui » donnée en référence à la décomposition de la lumière par un prisme (2.1.), soit par une réponse « non » mentionnant des parties non visibles du spectre (2.2). Dans ce dernier cas, on peut en effet faire l'hypothèse que des allusions à l'infrarouge ou à l'ultraviolet renvoient à des connaissances de physique sur la lumière et donc à la notion de longueur d'onde. Les deux sous-catégories sont compatibles avec une association biunivoque entre couleur et longueur d'onde.

Nous avons classé dans le troisième groupe les réponses mentionnant la lumière, mais ne pouvant s'interpréter par une association unique couleur → longueur d'onde : elles mentionnent les couleurs pigmentaires non visibles dans l'arc-en-ciel. Nous indiquons la fréquence des réponses pour chaque type entre parenthèses.

1. *L'arc-en-ciel comme « palette de couleurs » (60 %)*

1.1. OUI, « il y a 7 couleurs dans l'arc-en-ciel »

« toutes les couleurs primaires s'y trouvent ainsi que les couleurs primaires et secondaires » (M 57, 10, 26)¹

« dans l'arc-en-ciel, les couleurs sont séparées et nettes » (M 32).

1.2. NON, toutes n'y sont pas contenues.

Une distinction est faite entre les couleurs observées dans l'arc-en-ciel et celles que l'on peut obtenir par mélange de peintures, qui ont pour les étudiants, un caractère de réalité dû au fait qu'il s'agit de matière :

1. Références des élèves pour les réponses au questionnaire « St Rémy ».

- « les couleurs sont plus variées en réalité » (M 14)
- « empiriquement, toutes les couleurs ne sont pas présentes » (M 35)
- « elles ne sont pas représentées concrètement » (M 36)
- « il existe une infinité de couleurs obtenues par mélange (peinture, couleurs chimiques) » (M 23, M 6)
- « le blanc, le noir, le marron, le rose sont obtenus par mélange »
- « on utilise les 7 couleurs pour en créer d'autres » (M 7)
- « les trois primaires rouge, bleu, jaune à partir desquelles on peut créer toutes les couleurs et les complémentaires » (M 48, M 50)
- « non, dans l'arc-en-ciel il y a un dégradé de couleurs, mais pas de mélange ou de superposition » (M 25, M 35, M 11).

2. Arc-en-ciel et lumière (35 %)

Dans cette catégorie de réponses, il est fait explicitement référence à l'expérience de décomposition de la lumière blanche par un prisme, les gouttes d'eau jouant le même rôle que le prisme.

2.1. OUI, toutes les couleurs sont dans l'arc-en-ciel

- « la lumière blanche est composée de toutes les couleurs, sa décomposition donne l'arc-en-ciel » (M 55)
- « l'arc-en-ciel est le spectre de la lumière, toutes les couleurs sont dans la lumière » (M 46, 48, 19, 55, 56)
- « les gouttes d'eau décomposent les rayons du soleil » (M 22)
- « voir la décomposition par un prisme » (M 10 17 20 49)
- « le prisme solaire possède toutes les couleurs visibles par l'oeil humain » (M 59, 4)
- « oui, c'est la façon dont un objet ou une matière réagit avec les rayons lumineux qui donne la couleur. Pour l'arc-en-ciel, c'est l'action de la lumière sur les gouttelettes qui donne les couleurs » (M 28).

2.2. NON, certaines couleurs sont invisibles

- « ce sont des couleurs 'brutes', et d'autres ne sont pas perceptibles par nos yeux » (M 9)
- « il y a les ultraviolets qui ne sont pas visibles à l'oeil » (M 16)
- « il y a aussi deux couleurs limites non visibles à l'oeil nu (IR et UV) » (M 51, 53, 3, 45).

La réponse la plus documentée précise :

- « les UV et l'infrarouge ne sont pas dans le spectre, leurs longueurs d'onde ne sont pas perceptibles à l'oeil » (M 54).

3. Couleur - lumière et couleur - matière (5 %)

Il apparaît dans ce groupe de réponses une différence entre les couleurs pigmentaires et les couleurs de la lumière, mais il n'y a pas encore trace d'une compréhension unifiée où la lumière interviendrait dans tous les cas. Ces réponses montrent cependant une compréhension plus large des phénomènes de couleur.

« tous les blancs et les noirs et toutes les couleurs obtenues par addition ou soustraction ne sont pas contenus dans le spectre de la lumière blanche » (M 39)

« oui, toutes les couleurs sont dans l'arc-en-ciel, qui est en fait la décomposition de la lumière blanche, mais le noir (qui est l'absence de lumière) n'y est pas, ni les couleurs employées en peinture qui sont 'soustractives' (tons rompus et rabattus). Dans l'arc-en-ciel, on voit les couleurs de la lumière, de type additive (car lorsqu'on les ajoute une à une on arrive au 'blanc lumière' alors qu'avec la peinture on arrive au noir) » (M 60).

2.3.3. Points marquants

Toutes réponses confondues, 40 % seulement des explications intègrent la lumière et parmi celles qui la mentionnent, on note l'importance de celles qui sont compatibles avec l'adhérence entre couleur et longueur d'onde (1.1, 2.1, 2.2). C'est la mention des couleurs pigmentaires qui contribue le plus fortement aux réponses « non », mais on y trouve peu de justifications allant jusqu'à intégrer la notion de couleur obtenue par addition de lumières.

2.4. Addition de lumières et couleur

2.4.1. Question et résultats : synthèse additive

Q8.1. Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte. Qu'observe-t-on là où les faisceaux se superposent ?

du blanc	du marron	du jaune (réponse correcte)	du rouge et du vert	je ne sais pas
17	30	2	6	5
28 %	50 %	3 %	10 %	9 %

La couleur observée par superposition d'un faisceau de lumière rouge et d'un faisceau de lumière verte sur un même support diffusant blanc est jaune. Cette réponse correcte est très minoritaire (< 5 %).

Pour les 28 % qui répondent « blanc », la notion de couleurs complémentaires est utilisée :

« le rouge et le vert sont complémentaires et dans le système additif forment la lumière blanche » (M 60)

si on précise que c'est la superposition d'un faisceau de lumière rouge-magenta et d'un faisceau de lumière verte qui redonne la sensation de blanc, cette réponse est correcte, à ceci près que « rouge » et « magenta » sont confondus.

Pour 50 %, la référence est ici explicitement celle du mélange de peintures, « *rouge + vert = marron* ».

2.4.2. Rôle du système visuel

1. La question

Q8.2. Où se crée cette nouvelle couleur ?

dans l'espace, là où les faisceaux se rencontrent ☐

sur le décor ☐

dans l'oeil de l'observateur (sur la rétine) ☐

dans le cerveau de l'observateur ☐

2. Résultats

Cette question laisse les étudiants perplexes. Les commentaires sont beaucoup plus rares que dans les questions précédentes : 80 % des réponses ne comportent aucun commentaire.

Trois catégories de réponses peuvent être retenues.

- dans l'espace où les faisceaux se rencontrent et/ou sur le décor	30 %
- dans l'espace et/ou sur le décor et dans l'oeil et/ou le cerveau	30 %
- dans l'oeil de l'observateur (sur la rétine) et/ou dans le cerveau de l'observateur (réponse correcte)	40 %

Un premier groupe nie le rôle de l'oeil et du cerveau dans la perception de la couleur et localise la formation de couleur soit dans l'espace (où on ne voit rien), soit sur le support diffusant où se superposent les deux faisceaux (7 dessins ou commentaires) :

« la lumière crée la couleur, là où elle rencontre la matière. La couleur ne se crée pas dans le cerveau, ni dans l'oeil de l'observateur » (M 49).

Un deuxième groupe considère comme compatible la superposition des faisceaux sur le décor et le rôle de l'oeil, mais sans aucune justification.

Un troisième groupe choisit la (ou les) réponse(s) faisant intervenir l'oeil et/ou le cerveau, réponses que nous considérons comme correctes. Toutefois les réponses ajoutant des précisions sur le processus de la vision sont rares :

« c'est la rétine qui reçoit le faisceau de lumière, cônes et bâtonnets sont excités et envoient un message nerveux à l'aire visuelle du cerveau de l'observateur » (M 53, 54, 57).

Un schéma est accompagné de la légende suivante :

« la lumière agit sur l'oeil qui transmet l'information au cerveau. Mais la couleur ne nous est donnée que par le cerveau » (M 9).

Notons que dans ce troisième groupe, les réponses concernant la couleur résultant de l'addition de lumières sont fausses.

2.4.3. Points marquants

Cette question a laissé une impression de malaise (faible taux de commentaires), 30 % des étudiants ne font pas intervenir l'observateur, alors même que la proposition leur est faite. Le rôle de l'oeil n'est mentionné que par 70 % des étudiants, et ce taux comprend les 30 % qui disent aussi que la couleur se crée dans l'espace et/ou sur le décor.

De plus, on note que le résultat perçu (jaune) dans le cas d'addition de lumières colorées rouge et verte n'est pas connu.

2.5. La nuit, tous les chats sont gris

2.5.1. La question

Ce proverbe faisant référence à la couleur et à la sagesse populaire se présente comme une question ouverte. Pris au sens propre, il pose une question : voit-on les couleurs la nuit ? Il a été compris ainsi par les élèves, comme en témoignent leurs commentaires.

Q9. On dit : « la nuit, tous les chats sont gris ».

- | | | |
|---------------------------------------|-------|--------|
| 1. Cette affirmation vous paraît-elle | vraie | fausse |
| 2. Expliquez votre jugement. | | |

2.5.2. Réponses

faux	10	17 %
vrai	43	72 %
sans réponse	7	11 %

Bien que cette question ait été jugée difficile, elle a fait l'objet de commentaires de la part de 60 % des étudiants. Ces commentaires explicitent les éléments de la chaîne conduisant à la perception de la couleur de façon plus ou moins complète. Une seule réponse fait mention du fonctionnement du double système visuel des cônes et bâtonnets.

2.5.3. Quelques types de commentaires

1. Aucune référence, ni à la lumière, ni à l'oeil (5 % des commentaires)

Dans ces réponses, la couleur est une propriété de l'objet lui-même, elle existe indépendamment de la lumière, mais la nuit les couleurs sont modifiées :

« la couleur existe la nuit et ne se limite pas au blanc, noir et gris » (M41)

« les couleurs sont sombres » (M 2).

2. Absence de couleur liée à l'absence de lumière, lien lumière-couleur (60 % des commentaires)

La couleur a besoin de lumière pour s'exprimer, un lien entre lumière et couleur est reconnu. En terme de chaîne, on peut dire que de la lumière arrive sur l'objet, créant la couleur, mais la couleur reste une propriété de l'objet que la lumière révèle (pas de référence à la vision ni à la lumière renvoyée vers l'oeil) :

« pas de lumière, donc pas de couleur » (M 15, 46)

« la lumière sur la matière crée la couleur » (M 19 21 28)

« c'est la lumière qui fait la couleur, la nuit tout paraît sombre » (M 14)

« sans lumière, les couleurs s'estompent au point de devenir des formes d'ombres plus ou moins foncées » (M 7)

ou au contraire, la lumière renvoyée est mentionnée :

« un petit faisceau lumineux peut suffire pour réfléchir la couleur » (M 44).

3. Rôle de l'oeil dans la vision des couleurs (35 % des commentaires)

Dans ces réponses, le rôle de l'oeil de l'observateur ou la perception sont mentionnés :

« c'est la lumière qui crée les couleurs, elles sont traduites par l'oeil » (M 18, 40)

« la vision des couleurs se modifie à la tombée du jour, surtout due à la lumière artificielle, les couleurs se confondent » (M 10)

« la luminosité diminue, la perception des couleurs est difficile » (M 3, 53).

Dans une seule réponse, montrant une bonne connaissance de la structure de l'oeil, les deux systèmes visuels de la rétine sont explicités :

« les cellules sensibles à la couleur ont une basse sensibilité » (M 54).

2.5.4. Points marquants

Les commentaires majoritaires associent à juste titre la lumière à la couleur. Un tiers seulement des étudiants fait jouer un rôle à l'oeil et à la perception, dans la réponse à cette question.

3. ENTRETIENS EN PRESENCE DE DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

3.1. Présentation

3.1.1. Des situations expérimentales pour faire émerger connaissances et modes de raisonnement

La deuxième méthode d'investigation mise en oeuvre pour l'enquête préliminaire consiste en entretiens semi-directifs devant une situation expérimentale. Sur la base du volontariat et par groupes de deux ou trois, les étudiants ont accepté de s'enfermer dans un laboratoire obscur pendant deux heures en moyenne, de répondre à des questions et d'être enregistrés.

Le guide d'entretien a été construit autour de deux situations expérimentales repérées comme inconnues des étudiants. Ceux-ci sont invités à réaliser le montage et à observer. Puis il leur est demandé de se livrer à une activité d'interprétation de ce qu'ils voient. Les questions posées par l'interviewer (X), parfois inhabituelles, sont destinées à stimuler la réflexion. Les dialogues entre étudiants montrent une confrontation des points de vue et les points de blocage de chacun au cours de ce travail d'explicitation.

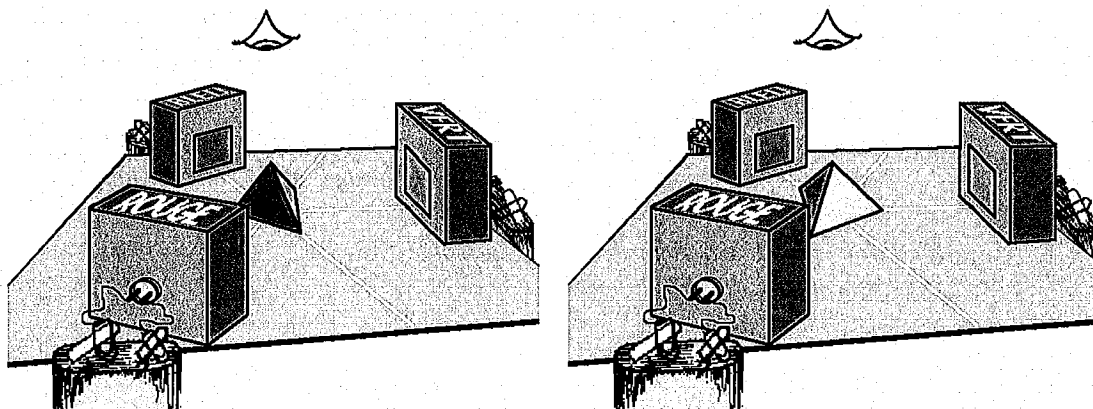
De la douzaine d'entretiens réalisés, nous extrayons quelques épisodes significatifs qui soulignent les connaissances des étudiants sur la couleur, dégagent les savoirs, les difficultés conceptuelles et les modes de raisonnement mobilisés pour analyser les situations proposées.

3.1.2. Les situations expérimentales choisies

Dans la première situation, il s'agit de réaliser avec un petit matériel, l'addition deux à deux des lumières fondamentales rouge, verte et bleue sur les faces d'un tétraèdre en papier blanc. Dans le cas de l'addition de deux lumières, l'une rouge et l'autre verte, la couleur perçue est jaune. La situation de production de cette couleur surprend les élèves ; on leur demande de l'interpréter grâce à la question : « Où se crée le jaune ? ».

La deuxième situation, dite des « ombres colorées », est une production d'ombres portées du tétraèdre sur un écran blanc avec les trois mêmes sources de lumière colorée rouge, verte et bleue. L'activité ici consiste à prévoir ce qu'on verra sur l'écran si on allume une, puis deux, puis trois des sources.

Pour analyser les deux situations, il faut mettre en évidence le fait que la lumière se propage entre la source, l'objet et l'oeil. La seconde nécessite une analyse plus précise en termes de propagation **rectiligne**, et de disposition relative dans l'espace des trois sources, de l'objet et de l'écran. Elle permet un début de réinvestissement de ce qui a été observé dans la première situation concernant la couleur perçue par addition de deux ou trois lumières. Elle implique aussi un raisonnement tenant compte de deux (ou trois) variables : sur une plage donnée de l'écran, la présence d'une ou deux lumières en même temps que l'absence d'une autre arrêtée par l'obstacle opaque.



3.2 Produire « du jaune » par addition de lumière rouge et de lumière verte

Note : dans tous les extraits d'entretiens, c'est nous qui soulignons en utilisant le caractère gras.

3.2.1 Voir « du jaune » : surprise et interrogation

L'observation d'une couleur jaune obtenue par addition de lumière rouge et de lumière verte provoque **surprise et interrogation**.

My : ...Là c'est bizarre, je ne comprends pas... car déjà le jaune est inclus là-dedans... et le bleu est inclus là-dedans... je suis incapable d'expliquer ça... (Entretien n°9, Myriam) ;

ou encore

C : C'est ça que je ne comprends pas, pourquoi quand tu ajoutes du rouge et du vert ça fait... (silence)... (Entretien n°10, Christine / Myriam).

Dans un premier temps de recherche d'explication, les connaissances mobilisées par les étudiants sont celles du mélange de peintures. Elles résultent pour eux d'une pratique expérimentale de plusieurs années, ce qu'ils expriment le plus souvent par des expressions comme « *en principe* » ou « *normalement* ». Deux types de connaissances sont utilisés :

- soit le résultat du mélange de deux peintures, rouge et verte, donnant une couleur marron :

St : Normalement quand on mélange de la peinture, du rouge et du vert, on n'obtient pas ça, on obtient du marron noir. (Entretien n°2, Laure-Emmanuelle / Stéphanie)

- soit le moyen d'obtenir le jaune en peinture. Cette couleur est une primaire à partir de laquelle les autres sont obtenues, ce qui place les étudiants devant une contradiction avec ce qu'ils savent :

My : Pour faire du jaune, il faut... du vert ?... le vert, c'est le bleu (cyan) et le jaune.

Ces connaissances ont acquis un tel statut d'automatisme dans le domaine de validité de la pratique de la peinture que la première difficulté pour certains

étudiants consiste à se rendre compte que la couleur perçue n'est pas marron mais jaune².

X : Qu'est-ce que vous voyez ?

A : Ça tend vers l'ocre... c'est pas ocre mais ça tend vers le marron, dans les mélanges picturaux, en principe, le rouge et le vert mélangés deviennent généralement une couleur marron.

X : Mais quand vous regardez, c'est marron ?

E : En pratique...

A : C'est un orange.

E : Moi je vois du jaune.

A : Un jaune... du dessus, on ne voit pas du jaune, je vois du marron, y'a peut-être un problème ?

X : Comme en peinture ?

A : Non pas du marron comme en peinture. Pour avoir une couleur comme ça... le problème c'est qu'il y a deux couleurs superposées...

E : Mets toi en face.

A : Du dessus je ne vois pas du jaune, de face je vois du jaune. De plus près, non la couleur est plus concentrée... (Entretien n°4, Elodie / Alain)

C'est là que le rôle des autres élèves du groupe est important pour souligner la contradiction entre les observations des différents participants. Toutefois sur l'ensemble des groupes, un consensus s'établit rapidement sur la caractérisation des couleurs perçues :

X : Etes-vous d'accord pour nommer les couleurs que vous avez sur chacune des faces ?

St : Oui, jaune magenta et cyan.

X : Avez-vous déjà obtenu ces couleurs de cette façon ?

LE/St : Non... (silence)... (Entretien n°2, Laure-Emmanuelle / Stéphanie)

Dans l'expérience, les faces magenta et cyan ne posent pas de question puisque les teintes sont peu différentes de celles qu'on obtiendrait par mélanges de peintures (rouge + bleu = violet pourpre foncé, bleu + vert = bleu-vert), alors que la face jaune contredit l'utilisation d'une telle règle :

Ma : Ça (magenta) et ça (cyan) c'est logique, c'est facile à comprendre, mais le jaune non. (Entretien n°7, Mara)

3.2.2. Présence de souvenirs scolaires

Outre les connaissances classiques pour ce type de public, émergent un certain nombre de points spécifiques.

A propos de la diffusion par le support blanc

Un point important consiste à analyser le rôle du support blanc. Le fait que l'écran blanc ne change pas la couleur est facilement accepté :

². Il ne s'agit pas ici du phénomène de constance de couleur.

So : En fait, la face du tétraèdre sert simplement de support, un peu d'écran. On a mis un blanc très blanc pour pas changer la couleur... On a l'impression que la face est colorée, mais c'est comme un écran, quoi, comme quand on projette des diapos.

Par contre, l'idée que les lumières rouge et verte soient diffusées par le papier n'est pas spontanée pour certains étudiants :

X : Oui, on essaie que l'écran diffuse la lumière dans toutes les directions pour que tous les spectateurs puissent voir.

So : Alors c'est ça, la lumière elle se projette sur le prisme.

X : Elle reste sur le prisme ?

So : Ah non! Elle reste pas dessus, elle est simplement renvoyée par le blanc et elle repart.

X : Où ? Pour que je puisse voir ?

So : Dans nos yeux.

Be : Ben oui. (Entretien n°12, Sophie / Béatrice).

L'absorption

Il est également fait appel à des souvenirs des cours de physique. Un phénomène comme l'absorption est invoqué, mais il n'a aucun caractère explicatif ici :

M : Les rayons lumineux de chaque source de lumière arrivent sur la face et sont absorbés par la face.

X : Ils sont absorbés...

M : Non ils sont reprojétés en jaune... Y'a pas une question d'absorption et après de reprojektion ?

X : Le papier que je vous ai mis là...

M : Il absorbe les rayons lumineux ou alors il diffuse ?

X : Le papier est neutre par rapport à la lumière : il renvoie toute la lumière qu'il reçoit.

M : C'est une question d'absorption de la lumière, non ?

X : Donc il se passe un phénomène d'absorption pour vous, sur cette face-là ?

M : Je crois que ça doit être ça, j'ai de vagues souvenirs... (rires) (Entretien n°5, Manuela / Sara).

La visualisation de la lumière

Un autre souvenir scolaire évoqué à propos de la question « où se crée le jaune ? » est celui de la visualisation du trajet de la lumière dans l'espace, associé à la présence de poussières et à l'idée de puissance du projecteur :

M : Non, c'est les deux faisceaux qui se rencontrent et avec nos yeux on voit les faisceaux qui se superposent, ça donne une couleur, mais finalement...

(Xa enlève le tétraèdre et fait se croiser les faisceaux dans l'espace)

Xa : On n'arrive pas à voir.

X : Quand la lumière se propage dans l'espace, est-ce qu'on la voit ?

Xa : Non, ici non, avec ça non.

X : Qu'est-ce qu'il faudrait ?

M : Il faudrait un faisceau qui soit convergent ? Divergent ? Il faudrait agir avec des lentilles, des lampes plus puissantes et agir avec des lentilles devant pour avoir des faisceaux plus directionnels et on verrait exactement dans le noir... on mettrait de la craie et on verrait...

Xa : Ici, on a des petits projecteurs, ils ne sont pas assez puissants pour pouvoir émettre un rayon lumineux qu'on puisse voir à l'oeil nu et alors ça (le tétraèdre) met en évidence le phénomène physique et si on n'avait pas ça, tout ce qu'on vient de voir avec le problème des faisceaux lumineux, s'il y avait de la poussière, on le verrait dans l'espace... le truc du jaune et du bleu dans l'espace, il se produit ici aussi. (Entretien n°11, Xavier / Mariam)

3.2.3. Etapes essentielles

Une analyse en terme de lumière

Le premier élément sur la voie d'une analyse correcte de la situation apparaît lorsque les étudiants comprennent que la couleur est ici produite par des faisceaux de lumière colorée. Mais cette idée constitue une difficulté importante que certains ne franchissent pas. Les termes utilisés sont presque toujours, en début d'entretien, ceux de la manipulation de la couleur en peinture :

He : Les deux couleurs sont bien étalées sur la même surface. Elles se superposent sur la même surface.

Ta : Un rouge et un vert. (Entretien n°13, Tania / Hélène)

Ainsi, même lorsque l'existence de lumière est suggérée avec une forte insistance par l'interviewer, comme dans l'extrait d'entretien qui suit, le mot « lumière » n'a jamais été repris par St. qui est restée bloquée par ses connaissances du mélange de peintures :

X : Quel est le trajet de la lumière ?

St : Le bleu va droit et ils se coupent au même endroit.

LE : C'est peut-être que la lumière est cassée par les arêtes du tétraèdre.

X : Si je cache le rouge, cette face ne reçoit que la lumière verte.

LE : Quand la rouge est allumée, elle éclaire les deux faces.

St : Ben oui mais normalement du rouge et du vert ça donne du noir, mais y'a peut-être le bleu d'en face qui fait changer...

LE : Mais non il n'arrive pas derrière, il n'arrive que sur ces faces devant.

X : Est-ce que le carton est transparent ?

St/LE : Non il est opaque. (...)

X : Que reçoit la face ?

LE/St : Du rouge et du vert.

St : Normalement quand on mélange de la peinture, du rouge et du vert, on n'obtient pas ça, on obtient du marron noir. (Entretien n°2, Laure-Emmanuelle / Stéphanie)

Lorsque l'interprétation en terme de lumière est reprise par les étudiants, une première idée de composition de la lumière émerge. Mais certains appliquent à la composition de la lumière ce qu'ils savent de la composition de la peinture de même couleur (vert obtenu par mélange de peinture bleu-cyan et jaune) et se heurtent à une première contradiction :

Ma : Pour moi, ça aurait dû faire du blanc.

Xa : À mon avis, je croyais que c'est parce que le faisceau lumineux qui part du projecteur vert contient du bleu et du jaune et à mon avis le bleu est absorbé.

X : Par quoi ?

Xa : Par la plage bleue qu'on a ici, par le vert qui est ici plus foncé, il faut qu'il ait encore du bleu. Bon je vais vous expliquer... (Entretien n°11, Xavier / Mariam)

Concevoir la différence entre mélange de lumières et mélange de matières

Cette difficulté, exprimée dans l'entretien précédent, en conduit quelques-uns à s'appuyer fortement sur ce qu'ils savent pour exprimer l'idée d'une distinction à faire entre les couleurs obtenues par addition de lumières et celles obtenues par mélange de peintures :

Xa : Nous, ce qu'on apprend en couleurs, c'est que le mélange des complémentaires, ça donne une terre. T'es d'accord avec moi ?

Ma : On sait qu'en lumière, contrairement à ce qu'on a en peinture, si on mélange toutes nos couleurs on arrivera à une couleur foncée, ici si on mélange toutes les primaires on arrivera à du blanc. Déjà ça marche pas du tout pareil. Si on mélange ce qu'on appelle nous des complémentaires, ça va donner des couleurs beaucoup plus claires. C'est l'inverse finalement. (Entretien n°11, Xavier / Mariam)

Etape vers une analyse correcte, cette distinction apparaît d'emblée comme une difficulté :

Ch : J'arrive pas à analyser la lumière comme une matière qu'on pourrait par exemple mélanger comme de la peinture, parce que là ce qu'on voit c'est un mélange de rouge et de vert... j'arrive pas... c'est peut-être parce qu'on voit pas la lumière en dehors du triangle blanc... j'ai peut-être pas étudié la lumière... (Entretien n°1, Charlotte / Mona)

Faire cette différence est encore loin d'une explication, que certains cherchent dans des registres variés. Ainsi plusieurs, affirmant que le vert est un mélange de jaune et de bleu, cherchent ce qui a bien pu faire disparaître le bleu pour qu'il ne reste que le jaune :

St : À mon avis, c'est le bleu qui mange, le bleu qui est déjà dans le vert et puis reste le bleu... parce qu'en fait y a du bleu qui est en face et qui doit couper le faisceau du vert et du rouge. (Entretien n°2)

Accepter la diffusion simultanée des deux lumières et penser au rôle de l'oeil

En cours d'entretien, l'acceptation de la diffusion simultanée des deux lumières rouge et verte par le papier blanc permet une avancée significative, où le rôle de l'oeil est envisagé :

X : Où se fait le jaune ?

My : C'est pas dans mon oeil ? C'est mon oeil qui voit ça... Ah oui c'est l'oeil, la rétine et le cerveau derrière ! (Entretien n°9)

Une question subsiste, associée à un besoin de compréhension globale

Cette prise en compte du rôle du système visuel dans la situation présentée favorise l'émergence de nouvelles questions :

So : Ben alors notre peinture ? C'est comment la peinture jaune ?

ou encore

M : Ce qui me tracasse c'est le mélange des couleurs.

C : Je ne comprends pas pourquoi avec la peinture, ça fait du marron, alors que là c'est jaune ! (Entretien n°10, Christine / Myriam)

Ce point n'est parfois évoqué qu'en fin d'entretien, traduisant un besoin de compréhension globale.

En réponse à cette question, l'interviewer suggère que la peinture jaune, éclairée en lumière blanche renvoie aussi de la lumière rouge et verte. Cette idée ne trouve une cohérence qu'en tenant compte de l'oeil, mais paraît abstraite à certains :

So : C'est-à-dire que la lumière qu'elle renvoie contient du rouge et du vert et nous, on le reçoit jaune.

Be : Mais on le voit pas.

So : On voit pas que c'est du rouge et du vert, on voit tout de suite que c'est le mélange des deux.

Be : Mais en fait c'est la théorie. (Entretien n°12, Sophie / Béatrice)

3.2.4. Un exemple de cheminement dans une interaction de deux étudiants

Dans l'extrait suivant, qui reflète une position minoritaire par rapport à la plupart des groupes, C. répond à l'interrogation de M. en introduisant l'idée d'interaction entre la lumière et la matière colorée :

M : Et en peinture ?

C : En peinture la couleur que tu obtiens, c'est la lumière qui passe là-dessus. Je pense que quand tu mélanges du rouge et du vert, c'est pas pareil. Ici c'est pas la même chose, c'est un faisceau lumineux, c'est de la lumière pure.

M : Sur la peinture, c'est quand il y a de la lumière blanche, naturelle.

C : Ici dans un faisceau c'est artificiel, la lumière artificielle n'est jamais pure.

X : Les faisceaux que j'envoie là sont artificiels ?...

C : Oui voilà c'est de la lumière, une lumière colorée. Tandis que quand on fait de la peinture, les pigments sont déjà là, on a déjà la matière et la lumière elle vient après. Le reflet, il agit sur la matière.

Dans la suite de la discussion, C. tente de convaincre M. et insiste sur le fait que la couleur est une sensation visuelle. Si M. accepte ce point de vue quand il s'agit de lumières, elle le refuse lorsqu'il s'agit de peintures, le « jaune » reste une propriété de la matière, M. n'accepte pas que la couleur soit une réponse à de la lumière reçue par l'oeil :

M : Oui, donc il agit sur le papier. Je pensais qu'avec la peinture, la couleur que tu vois elle existe réellement sur le papier.

C : Non non elle n'existe pas réellement.

M : C'est pas une interprétation de l'oeil.

C : Moi je crois que c'est une interprétation de l'oeil. Ce qu'il y a sur le papier c'est une interprétation de l'oeil.

M : Alors que pour obtenir le jaune avec du rouge et du vert, c'est une interprétation de l'oeil. On l'a pas directement sur le papier, c'est l'oeil. Avec le mélange, on a une manière différente de percevoir le rouge et le vert et le mélange donne du jaune dans l'oeil.

M : Sur le papier en peinture, on ne voit pas ni rouge ni vert, on ne voit que du jaune. A mon avis le jaune de peinture, il existe sur le papier, alors que le jaune avec les lumières, il est interprété par l'oeil, juste compris et perçu par l'oeil, il n'existe pas sur le papier, sur le support.

C : Moi je pense qu'il n'existe pas sur la surface.

M : Avec la matière ?

C : Oui.

M : Je pense qu'il existe.

C. a des connaissances sur la vision et relie lumière reçue et couleur perçue :

C : Pourquoi est-ce que les chiens ne voient pas les couleurs ? C'est les pigments dans l'oeil. On reçoit la même lumière, nous. C'est nous qui créons les couleurs, les chiens eux n'ont pas ces pigments, donc ils ne voient pas ces couleurs.

M : Ils n'ont pas la capacité de les voir, ils n'ont pas les moyens de les voir

C : Nous on les a, eux ils les ont pas, donc c'est dans notre oeil.

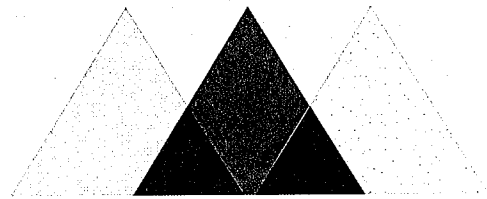
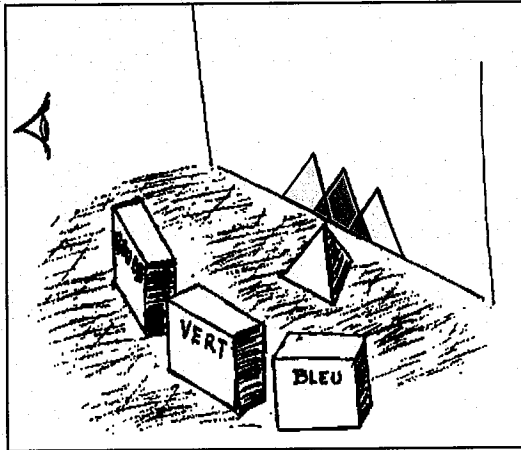
Les deux étudiantes acceptent qu'une même couleur puisse être perçue dans des conditions de production différentes :

X : Si je ne vous avais pas montré comment je l'ai fait (le jaune), vous auriez pu croire que j'avais étendu une couche de peinture sur le papier blanc ?

C/M : Tout à fait. (Entretien n° 10, Christine/ Myriam)

3.3 Les ombres colorées

Devant la manipulation installée, lampes éteintes, la consigne qui est donnée aux étudiants est de prévoir ce qu'ils verront sur l'écran blanc avec une source allumée, puis deux, puis les trois.



Les exemples d'entretien qui suivent montrent les stratégies mises en place par les étudiants pour faire ces prévisions et ensuite expliquer ce qu'ils voient.

3.3.1. Un exemple de démarche

Nous donnons pratiquement *in extenso* l'enregistrement d'une discussion sur la prévision et l'observation dans le cas de deux ombres. Le temps passé à l'interprétation et les relances de l'interviewer donnent la mesure des difficultés rencontrées par certains groupes.

Prévision : l'ombre est noire

Be : Réfléchissons.

So : Le triangle va être blanc derrière, puisque là ça cache, vu que les lumières elles passent comme ça. Donc là il va rien y avoir et donc en fait c'est noir.

Be : C'est blanc.

So : Elle sera noire, (l'ombre) derrière.

X : Et autour ?

So : Cette lumière va aller là.

Be : Ça suit la direction des faisceaux.

(dessin : triangles noirs, fond jaune, dégradé).

Après une première hésitation où *So.* envisage que l'ombre conserve la couleur du papier, donc reste blanche, l'accord se fait sur des ombres noires de forme triangulaire. On note ici que le résultat de l'addition des deux lumières sur le fond est immédiatement réinvesti, ce qui engendre la satisfaction lors de la vérification.

Vérification partielle

Be/So : Oh là, là ! ben voilà !

Be : *En fait, c'est pas noir, c'est l'ombre de chaque faisceau. C'est bizarre ! Y'a quand même une petite ombre noire au milieu.*

So : *On avait quand même bon, c'est jaune autour. Mais au lieu que ce soit noir, l'ombre elle prend la couleur du faisceau, quoi !*

Be : *Oui, et elles se superposent en plus ! je ne comprends pas pourquoi le rouge ?*

Questions et interprétation

So : *En fait, le rouge qui est là, il fait hop, hop (de la source à l'objet, et de l'objet à l'écran, pas de propagation rectiligne de la source à l'écran). Mais justement le vert comment il va ?*

Be : *Le rouge ? Je comprends pas pourquoi il est pas de l'autre côté du vert.*

So : *Moi non plus... Je vois pas comment le vert il peut passer là-bas.*

Be : *Alors qu'il est en face, lui !*

So : *Le vert, il est caché.*

Be : *C'est bizarre, le rouge, il est derrière, alors ça doit dépendre...*

Manipulation

So : *Attends j'essaie quelque chose...*

X : *Qu'est-ce que vous essayez ?*

So : *En fait quand je bouge la lumière verte, ça fait bouger l'ombre rouge. Et toi quand tu bouges la lumière rouge, ça fait bouger l'ombre verte. Bizarre...*

X : *Cachez l'une des sources.*

So : *Rouge, avec l'ombre noire.*

Be : *En fait, les faisceaux se croisent et leur jonction donne l'ombre, c'est ce qui donne l'ombre.*

Explication en termes de propagation de la lumière

X : *Quand vous cachez la lumière rouge, tout l'écran est vert*

Be : *Je comprends vraiment pas pourquoi... C'est compliqué... (silence)*

X : *Qu'est-ce que c'est l'ombre ? Est-ce qu'il y a de la lumière derrière l'objet à cet endroit là ?*

So : *C'est opaque. Bon oui, y a pas de lumière (verte). En fait, c'est cette lumière (rouge) qui vient là.*

X : *Oui*

So : *Mais comment elle fait pour y aller ?*

X : *Quand je cache la lumière rouge, je n'ai l'ombre que de la lumière verte. Je n'envoie que la lumière rouge sur cette même plage.*

So : *Vu qu'on a vu que c'est le seul endroit où il n'y a pas de lumière verte*

X : *Et de l'autre côté ?*

So : *Y'a du rouge partout, sauf à cet endroit là. Je vois mal comment le vert il peut aller là-bas sans être caché par quelque chose.*

X : *La lumière verte éclaire tout, sauf ce triangle.*

Acceptation et intégration

So : Ah oui! c'est vrai !

Be : Ah oui! De même que le rouge éclaire tout sauf ce petit triangle-là, donc en fait c'est vert.

So : J'ai compris.

Be : D'ailleurs quand vous mettez vos doigts c'est pareil. (Entretien n° 12 - Ombres, Sophie / Béatrice)

La compréhension du phénomène est acquise lorsque l'éclairement de l'écran par l'une des lumières est imaginé en même temps que l'absence de l'autre lumière. Celle-ci est manifestée par le déplacement des objets pour tenir compte de la disposition géométrique et par l'observation du caractère reproductible de la situation.

3.3.2. Un exemple d'interaction entre élèves conduisant à un compromis faux

Ce deuxième exemple montre d'abord la présence de difficultés analogues à celle du groupe précédent, mais la stratégie développée est différente. Dans l'entretien qui suit, *LE.* trouve immédiatement la solution, prévoit correctement la couleur du fond, mais elle se trouve déstabilisée par les difficultés de *St.* Pour cette dernière, qui hésite entre deux conceptions, « l'ombre est noire » et « l'ombre est une projection de l'objet sur l'écran », la présence de l'autre lumière sur la plage n'est pas envisagée. Elles se mettent d'accord sur un compromis faux, « l'ombre est un peu foncée », comme le montre leur dialogue.

Une prévision correcte

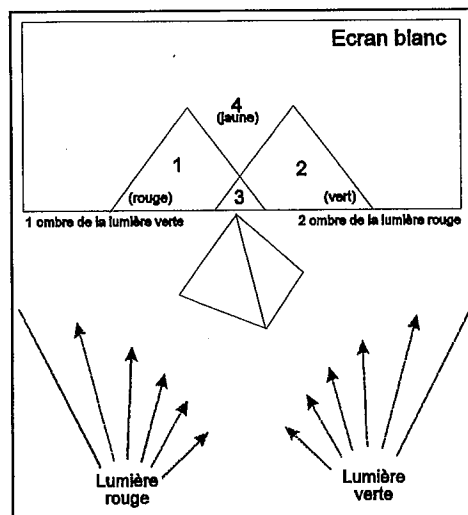


Schéma 2 : schéma correct de Laure-Emmanuelle dans le cas de deux sources

LE : (commentant son schéma) Là, ça va être rouge (en 1), la lumière sera rouge. Mais là (en 1) il y aura l'ombre de la lumière verte, donc ça va rester rouge. Mais à l'extérieur (en 2), ça va être vert, et là il y aura du vert et du rouge, donc ça va être jaune (en 4).

St : Oui, le jaune je suis d'accord avec toi. Mais là, (en 3) pourquoi c'est vert ?

- LE : *Parce que sur celle-là, on retrouvera les deux couleurs.*
 St : *Moi, je verrais le jaune ici (en 3).*
 LE : *Non, parce que c'est les deux ombres, là ça va être complètement noir.*
 St : *Mais c'est là où le rouge et le vert se rencontrent.*
 LE : *Non ici, ça va être complètement noir.*
 St : *Comment ça ?*
 LE : *Cette partie va rester rouge, il n'y aura pas de vert dedans.*
 St : *Mais non parce que c'est l'ombre.*
 LE : *C'est l'ombre de la lumière verte. Si oui, ça veut dire qu'il n'y a pas de lumière verte à cet endroit là. Mais il y aura de la lumière rouge, donc ça va faire juste un triangle en rouge. Tu vois pas comme ça ?*
 St : *Non.*

Un compromis faux

- LE : *(dessinant) là, ça va être rouge parce que tu as mis un spot rouge. Là, c'est l'ombre de la lumière verte, là autour tu auras du vert.*
 St : *Là on aura du jaune, là on aura du vert...*
 LE : *Là, tu as la superposition des deux ombres, ça va être noir.*
 St : *Oui.*
 LE : *Donc, là, ça va être rouge.*
 St : *Euh... oui...*
 LE : *Non tu crois pas ?*
 St : *C'est une ombre, c'est pas comme si tu projetais un triangle rouge.*
 LE : *Ben non.*
 St : *Mais l'ombre sera obligatoirement foncée.*
 LE : *oui, si tu veux, ça va être un peu foncé, l'ombre sera un peu foncée. Rouge foncé, vert foncé. (Entretien n° 2, Laure-Emmanuelle/Stéphanie)*

Ce compromis consiste à ajouter la couleur de la lumière à une propriété de l'ombre considérée comme une caractéristique d'objet, selon un raisonnement analogue à celui rencontré lors de l'addition des couleurs comme en peinture. Ici, « rouge + foncé » donne une couleur « rouge foncé ».

3.3.3. Les principales difficultés liées à la propagation de la lumière

Une propriété de l'ombre : l'ombre est noire

Les deux exemples précédents ont fait apparaître cette première difficulté rencontrée par tous les groupes. Le résultat de l'expérience courante apprend que l'ombre est foncée, alors qu'une analyse de l'ombre comme absence de lumière n'est pas une démarche spontanée. La situation proposée, inhabituelle, ne permet pas une réponse stéréotypée.

Les couleurs s'inversent : ombre « voyageuse » ?

Sur les schémas recueillis en cours de prévisions, une erreur fréquente consiste à attribuer la couleur de la lumière à l'ombre portée due à cette même lumière. L'ombre portée de la lumière rouge est prévue rouge, d'où la surprise devant l'observation, où les couleurs attendues ne sont pas sur les plages :

Ch : *Ce que je ne comprends pas c'est le croisement des faisceaux lumineux.*

ou Be : *Le rouge ? Je comprends pas pourquoi il est pas de l'autre côté du vert.*

On peut interpréter cette erreur des élèves comme une conception de la formation de l'ombre en terme d'ombre « voyageuse », où l'ombre est une sorte d'« image » de l'objet ayant même forme et même couleur (*The "reified" model*, Feher 1987).

Les couleurs s'ajoutent

La tendance naturelle des étudiants les porte à ajouter les couleurs des ombres, comme s'il s'agissait de peintures. Lorsqu'en cours d'interprétation de l'expérience avec trois sources (voir schéma p. 49), ils analysent quelles lumières atteignent les plages d'ombre de l'une des sources, ils ne poussent pas le raisonnement correct jusqu'au bout. Lorsqu'une seule lumière atteint la plage, (là où deux plages d'ombre se superposent), ils reviennent à un raisonnement par addition de couleurs :

Li : *Un petit (triangle) bleu et un petit (triangle) rouge.*

X : *Le bleu-violet, à quoi ça correspond ?*

Ma : *Il vient du mélange entre le magenta et le cyan, non ?*

Mu : *Et là, pareil, ce qu'on voit ça vient du jaune et du magenta.*

Li : *Tout est blanc autour ! On est des bêtes d'expérimentation !*

X : *Je ne suis pas d'accord sur le bleu et le rouge.*

Li : *Alors on réfléchit...*

Ma : *En fait, c'est juste la réflexion du rouge qu'on a là, et la réflexion du bleu qu'on a là. (Entretien n°4, Lionel / Mara / Muriel)*

3.3.4. Difficultés mettant en jeu le système visuel

Une ombre est toujours colorée

Dans le cas d'une seule source, certains étudiants prévoient une ombre « gris coloré ». C'est un résultat correct d'observation qu'ils ont appris en arts plastiques et dont l'origine se situe dans le fonctionnement du système visuel. Lorsque l'observation d'une ombre en lumière colorée est faite en présence de lumière ambiante, ce phénomène de contraste simultané[☆] est particulièrement remarquable.

Mais rares sont les étudiants qui maîtrisent cette donnée. Lorsqu'on sollicite une explication plus précise, cette connaissance se manifeste souvent par l'utilisation d'une règle où intervient la notion de couleur complémentaire :

Li : *C'est un peu bizarre ! C'est la complémentaire !*

ou bien elle fait intervenir la diffusion de la lumière par l'objet :

Ma : *Une fois que l'ombre est éclairée, elle devient verte...ou alors c'est la face qui reflète. Non, c'est impossible. Elle (la lumière) peut pas faire ça (geste de Ma. de la source vers l'objet et de l'objet vers la plage d'ombre). (Entretien n°4)*

*Repérage du phénomène de contraste simultané**

Dans l'extrait suivant, qui ne porte que sur l'activité d'interprétation de ce qu'elles voient, les étudiantes passent en revue l'ensemble des difficultés qu'elles ont rencontrées dans la phase de prévisions : l'ombre « noire », le fait que les couleurs « s'inversent ». L'interprétation correcte en terme de lumière les conduit à une observation plus attentive : la plage qui reçoit la lumière verte paraît d'un vert tirant sur le bleu (cyan) tandis que celle qui reçoit la lumière rouge paraît d'un rouge qui tire sur le bleu (magenta), ces deux plages étant vues sur fond jaune.

Ch : La rouge arrive ici et le triangle qu'on voit ici, c'est l'ombre du rouge, donc normalement y'a pas de rouge. Et ici, le vert devrait être vert, mais il est bleu. Donc y'a une autre couleur.

Mo : C'est l'ombre de la lumière rouge ...

Ch : Normalement, il ne devrait pas y avoir de couleur, et donc en fait l'ombre a une couleur.

Mo : Ce que je ne comprends pas, les lumières s'inversent. Tu vois normalement ça, cette ombre-là, c'est celle de la lumière verte.

Ch : Mais elle est éclairée par le rouge.

Mo : Non, mais regarde ! Attends, regarde si je retire la lumière verte, on voit le rouge.

Ch : C'est normal, parce que la verte quand elle vient ici, elle fait cette ombre-là.

Mo : Oui, d'accord.

Ch : Et l'ombre est éclairée par le rouge, et, donc l'ombre a une teinte.

Mo : Je ne sais pas, l'ombre en fait... c'est-à-dire qu'il y a le fond d'une couleur...

X : le fond est de quelle couleur ?

Ch : Jaune.

X : Le fond est jaune, pourquoi ?

Ch : Parce qu'il reçoit les couleurs rouge et vert.

Mo : (montrant) Non, c'est les couleurs complémentaires, jaune (le fond), rouge (l'une des plages), bleu (l'autre).

X : Vous trouvez que c'est bleu ?

Mo : C'est du bleu turquoise. (Entretien n°1, Charlotte / Mona)

Il s'agit là encore du phénomène de contraste simultané correctement observé.

3.4. Récapitulation

3.4.1. Des situations de questionnement

Les deux situations expérimentales qui ont servi de support pour les entretiens se sont révélées particulièrement adaptées pour obtenir des informations sur les idées et les modes de raisonnement des élèves.

La première a permis de poser un problème relatif à la couleur et a joué le rôle de déclencheur de questionnement. Produire ici du jaune par addition de lumière rouge et de lumière verte provoque la déstabilisation des élèves en créant une contradiction entre ce qu'ils voient et ce qu'ils savent, manifestée par la fréquence des expressions telles que « *normalement, nous ce qu'on sait...* », opposées à « *en fait, ce qu'on voit ici...* ».

Les connaissances mobilisées, acquises par la pratique de la peinture où la couleur est obtenue par mélange de matières, ne sont pas transférables dans les situations présentées ici, où la couleur est obtenue par mélange de lumières.

3.4.2. L'activité des élèves

Les larges extraits d'entretiens montrent que les activités proposées ont donné l'occasion aux élèves d'exprimer leur point de vue, de s'investir dans une recherche d'explication et d'analyse des situations expérimentales.

A l'intérieur des petits groupes, des niveaux de compréhension différents sont apparus. Les étudiants ont été amenés à expliquer, convaincre et faire partager leur point de vue, ce qui les a conduits à des compromis qui ne débouchent pas forcément sur une analyse correcte, mais le plus souvent sur un effort d'explicitation de leurs idées.

On a pu observer que ces deux situations permettent d'amorcer un travail de conceptualisation de la lumière où lumière, système visuel et couleur perçue sont mis en relation.

4. CONCLUSION DE L'ENQUETE PRELIMINAIRE

On peut résumer les informations obtenues comme suit.

Des étudiants ont, avant enseignement, des connaissances non négligeables sur les techniques de peinture et, pour au moins la moitié d'entre eux, des souvenirs de physique.

L'exploration de leurs connaissances par questions et entretiens révèle un ensemble de difficultés auxquelles on peut s'attendre avec ce public spécifique. Dans l'enseignement artistique, comme dans la vie de tous les jours, la couleur est principalement associée à la matière colorante ; dans l'enseignement de la physique, la couleur est associée uniquement à la longueur d'onde. La perception de la couleur est prise en compte dans le domaine artistique en particulier, mais elle est souvent considérée comme un phénomène subjectif et non scientifique. Les étudiants n'établissent pas de connexion entre les différents modes de connaissances de la couleur.

Plus à l'aise à propos des techniques de synthèse soustractive, les étudiants donnent plus facilement à ce sujet des réponses techniquement correctes (exemple des filtres : Q 5.1.) que des explications impliquant la lumière. Des difficultés subsistent, même sur le plan strictement technique, à propos des procédés de synthèse additive, mal différenciés des précédents. Une question du registre « physicien », celle de l'arc-en-ciel, déclenche de nombreuses réponses compatibles avec l'adhérence couleur-longueur d'onde, et fort peu qui laissent penser que d'autres couleurs puissent s'obtenir par synthèse additive de lumières. Le rôle de l'oeil, relativement admis dans une question le mentionnant explicitement, l'est beaucoup moins spontanément lorsqu'il s'agit d'expliquer des phénomènes perceptifs (par exemple « la nuit tous les chats sont gris »).

Les entretiens, dont la section précédente résume les apports, confirment à quel point l'adhérence couleur-matière colorante peut s'interposer dans l'analyse de situations de synthèse additive, et la difficulté que ces dernières suscitent, par leur référence obligée au rôle de la perception.

Ces entretiens nous ont fourni de plus des éléments importants pour la conception de la séquence que nous décrivons maintenant. Dès à présent, ils indiquent qu'il est possible de susciter chez nos étudiants un engagement actif dans la recherche d'une compréhension unifiée des phénomènes de couleur.

Plus précisément, les deux situations expérimentales choisies comme base de recueil d'informations ont déclenché discussions, questions et envie d'en savoir plus chez les étudiants. Nous faisons l'hypothèse que ces situations peuvent être utilisées en classe, avec des groupes plus nombreux, comme situations d'apprentissage.

CHAPITRE 2

UNE SEQUENCE D'ENSEIGNEMENT SUR LA COULEUR PRINCIPES ET DESCRIPTION

« La pleine compréhension des phénomènes naturels, comme nous les voyons, doit dépasser la physique au sens habituel. Nous ne nous excusons pas de faire ces excursions dans d'autres domaines, parce que la séparation des domaines (...) ne relève que de la commodité humaine et n'est pas une chose naturelle. (Feynman 1970) »

1. PRINCIPES DE CONSTRUCTION

La séquence décrite a été proposée dans le cadre de l'enseignement de sciences appliquées pour les élèves des sections d'arts appliqués. On trouvera les textes des programmes des différentes sections en annexe IV. L'expérimentation de la séquence s'est faite sur deux années consécutives. Nous en donnons ici la version correspondant à la deuxième année d'expérimentation. Une version correspondant à la première année a été rédigée pour le bulletin de l'Union des Physiciens et destinée aux enseignants de collèges (Chauvet 1993).

1.1. Introduction

L'objectif général de cette séquence est de situer les phénomènes liés à la couleur et de chercher à les articuler avec les idées, les concepts et les connaissances scientifiques de chaque domaine impliqué :

- la physique et la chimie : la lumière, les propriétés des radiations, les interactions lumière / matière, les phénomènes d'absorption liés à la structure chimique des corps ;
- les mécanismes de la vision et la perception : l'oeil, les récepteurs rétiniens de la vision des couleurs et l'analyse des phénomènes perceptifs liés à la vision des couleurs ;
- les applications techniques et les moyens plastiques : la production et la reproduction de la couleur, une introduction à la colorimétrie.

Pour chaque phénomène de couleur, à chaque étape, nous nous appuyons sur ces trois entrées. Notre objectif n'est pas de développer les trois domaines, mais de réunir et synthétiser des données pour tisser un ensemble cohérent et accessible.

Les procédés techniques de production de couleurs sont utilisés comme situation expérimentale et base de la discussion et de la conceptualisation : la technique est donc présente à chaque étape, contribuant à ancrer l'enseignement dans une pratique.

1.2. Les principaux choix de la séquence d'apprentissage

1.2.1. Guidage dans la construction des connaissances

Cette séquence s'inscrit dans une perspective constructiviste au sens large, où l'étudiant est considéré comme devant construire activement ses connaissances, compte tenu de celles qu'il possède déjà. Mais si son cheminement est actif, il est aussi, dans cette proposition, très guidé. On est donc bien loin d'une idée de redécouverte.

La proposition du problème, dans la classe, se fait à partir de situations artificielles et construites pour ce public. La construction de connaissances, si elle a lieu, se fait dans la mesure où les étudiants se prêtent au jeu et donnent du sens aux questions proposées (ce que Brousseau (1986) appelle « la dévolution du problème »).

L'attention et l'activité sont constamment sollicitées à travers des demandes de prévisions devant dispositif expérimental, d'observation, de débats, de synthèses verbales ou graphiques. L'aptitude à raisonner est sollicitée par le fait que les outils conceptuels nécessaires à la solution des problèmes posés sont en principe toujours disponibles parce qu'objets des séances précédentes. On cherche ainsi à promouvoir une attitude de confiance en la mise en oeuvre d'un raisonnement, par opposition au problématique rappel de connaissances mémorisées. Ceci ne peut se faire sans une importante planification des « entrées en scène » des éléments conceptuels visés.

Ce style d'enseignement où les concepts sont tour à tour cibles de l'enseignement et outils dans l'arsenal de résolution du problème suivant, en présence de situations expérimentales simples, artificielles et motivantes, rappelle celui qui préside à la proposition de W. Kaminski (1991). L'abondance des phases de débat et l'initiative des étudiants rendue possible autour de chaque situation expérimentale contribuent à équilibrer l'apparente rigidité de la proposition. Le terme de « structure didactique » suggéré par M.J. Vollebregt (1993) pourrait rendre compte de cette architecture conceptuelle très « pensée » compatible avec des degrés de liberté non négligeables aussi bien pour l'enseignant que pour l'étudiant.

Cette marge de manoeuvre réside surtout dans une intégration ou une réorganisation, plus ou moins complètes, des connaissances acquises lors de divers enseignements ou expériences préalables dans le schéma de raisonnement proposé. Un signe d'adhésion à la démarche sera l'émergence de nombreuses questions du type « *comment ça marche ?* » anticipant les problèmes posés dans la suite de la séquence.

1.2.2. Stratégie d'enseignement

Pour donner une cohérence à l'ensemble des phénomènes conduisant à la perception de la couleur, nous avons fait le choix d'objectifs intermédiaires, tenant compte des obstacles repérés dans l'enquête préliminaire. Nous structurons un travail de conceptualisation de la couleur en trois phases.

La première phase consiste à provoquer une déstabilisation des étudiants dans leurs conceptions relatives à la couleur et à poser un problème qui n'est pas soluble par la connaissance du mélange de peintures. La situation d'addition de lumières colorées dégagée plus haut lors des entretiens (addition de lumière rouge et verte) répond à ces critères. Par ses caractéristiques nouvelles, elle invite les étudiants à ne plus utiliser comme unique mode de raisonnement les règles du mélange de peintures. On travaille d'abord à associer couleur perçue et lumière reçue, puis, par l'addition deux à deux des lumières colorées de base, à analyser les conditions de production de nouvelles couleurs (séance 1).

Dans la deuxième phase, la notion de soustraction fait l'objet d'une attention particulière : elle est d'abord illustrée par l'effet d'un obstacle opaque dans des expériences d'« ombres colorées » (séance 2). Ce n'est qu'ensuite qu'elle est associée à la couleur des objets transparents ou opaques. La maîtrise d'une combinatoire sur les lumières colorées est un objectif visé avant de mener une analyse spectrale de la lumière blanche et des lumières colorées (séance 3). On fait ensuite apparaître l'*analogie de fonctionnement* par absorption sélective des matériaux transparents (filtres) et des matériaux opaques (pigments, peintures) par rapport à la composition de la lumière reçue par l'observateur (séance 4).

Enfin, dans une troisième phase, ces éléments conceptuels trouvent à se réinvestir dans l'analyse de phénomènes plus complexes, par exemple lorsqu'on éclaire des objets colorés non plus en lumière blanche mais en lumière colorée (séance 5).

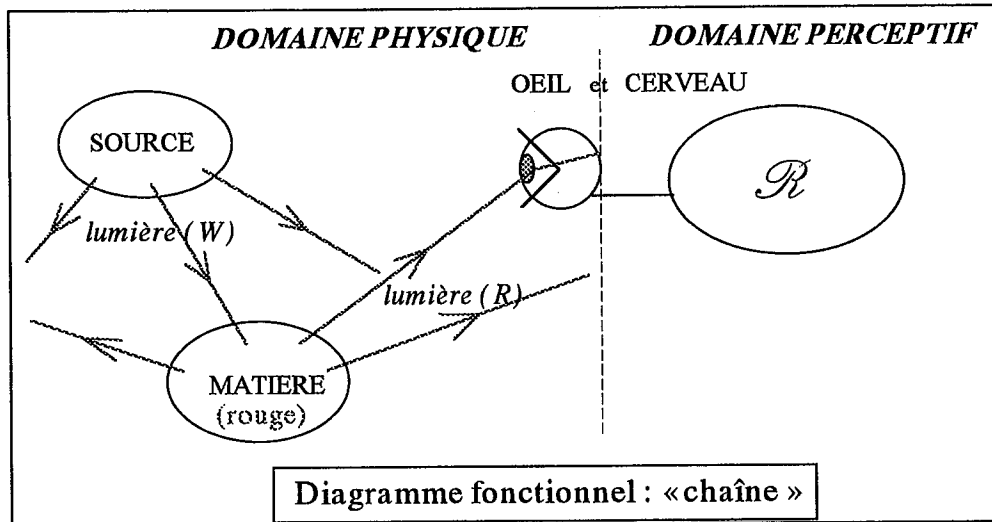
1.2.3. Intégrer physique, techniques et perception : idée de chaîne

L'enquête préliminaire a montré que les étudiants possèdent certaines connaissances, mais disjointes et non transférables d'une situation à une autre ; elles constituent un patchwork venant des approches théoriques et pratiques issues des enseignements d'arts plastiques et des vestiges de cours de physique.

Ainsi pour provoquer un déplacement du concept de couleur par rapport aux associations courantes (couleur et matière, couleur et lumière) sans lien, ni entre elles, ni avec la perception de la couleur, et rendre les étudiants capables de faire des prédictions, nous proposons un outil pour l'analyse des situations de couleur : l'idée d'une chaîne de traitement des informations sur la couleur transportées par la lumière jusqu'à l'oeil.

La source émet la lumière, la matière colorée agit sur la lumière reçue, la diffuse ou la transmet, la lumière émergente pénètre dans l'oeil de l'observateur jusqu'à la rétine. Ainsi dans l'espace physique, la lumière est le véhicule de l'information sur la couleur. La réponse perceptive est le résultat d'un traitement de cette information par le système visuel (oeil et cerveau).

Le schéma qui suit traduit le cadre théorique dans lequel nous situons le concept de couleur.



Dans le domaine physique, la lumière colorée (ex. rouge : R) est représentée par un caractère différent de celui qui symbolise la couleur perçue (\mathcal{R}).
W = white (blanc).

En bref, on cherche à substituer à des adhérences terme à terme, une trame de raisonnement impliquant un suivi sur un ensemble de transformations. On peut noter au passage que la nature séquentielle du raisonnement proposé rejoint une tendance naturelle du raisonnement (Closset 1983, Rozier 1988), ici sans inconvénient pourvu que l'ensemble de la chaîne soit bien pris en compte.

1.2.4. Composantes conceptuelles de base

Le concept de couleur que nous choisissons d'enseigner se situe dans le cadre de la psychophysique. Le phénomène de couleur y est fondamentalement associé à la perception visuelle et cet aspect sert d'ancrage principal à toutes les notions introduites.

1. La lumière et ses propriétés

La lumière *blanche* est la lumière du jour ou celle donnée par une lampe à incandescence. L'expression *lumière colorée* est prise ici au sens de « qui produit la sensation[☆] de couleur ».

La lumière, blanche ou colorée, est invisible « de profil » lorsqu'elle se propage et ne produit une sensation que si elle pénètre dans l'*oeil de l'observateur* : l'oeil est le récepteur de lumière et l'observateur fait partie intégrante du dispositif à analyser.

Ainsi, à propos de la lumière, nous dégageons les propriétés qui sont à l'origine de la sensation de couleur, *énergie transportée et composition spectrale*, sans développement sur la nature ondulatoire ou corpusculaire de la lumière.

2. La composition spectrale de la lumière

Le spectre de la lumière blanche est découpé de façon simplifiée en *trois bandes* correspondant aux couleurs rouge, vert et bleu appelées couleurs

fondamentales. Ce découpage se trouve justifié par les résultats expérimentaux de la colorimétrie et les théories neurophysiologiques sur la structure de l'oeil (Buser, Imbert 1989).

Lorsque la lumière colorée provient d'une émission directe, par exemple dans le cas des luminophores des écrans couleurs des téléviseurs, la composition spectrale est également une bande large dans les domaines des longueurs d'onde courtes (bleu), des moyennes (vert) ou des grandes (rouge) (Nassau 1980).

3. Les grandeurs énergétiques et lumineuses

A la quantité d'énergie émise par une source étendue primaire ou un objet diffusant correspond une grandeur photométrique, la *luminance*, qui tient compte de l'efficacité de cette énergie pour produire la vision. On trouvera en annexe II un tableau récapitulatif des correspondances entre les grandeurs énergétiques et les grandeurs lumineuses. La caractéristique de la sensation de couleur correspondante est décrite en termes de *luminosité*.

4. L'origine de la couleur des corps : interaction lumière et matière

Dans la vie courante et pour les applications techniques auxquelles nous nous intéressons ici, les couleurs perçues sont rarement produites par des radiations monochromatiques, mais beaucoup plus souvent par la *soustraction* partielle ou totale, dans la lumière blanche incidente, d'une bande de radiations plus ou moins large *absorbée* par la matière colorante. C'est le cas notamment des filtres (formés à partir de colorants organiques) et des pigments (minéraux ou organiques) qui absorbent de façon sélective certaines bandes de longueurs d'onde et transmettent ou diffusent le reste.

5. Vision des couleurs

La couleur est une sensation qui résulte d'une certaine composition de lumière reçue par l'observateur. Cette sensation est décrite par trois paramètres, la teinte[☆], la saturation[☆] variant de couleurs neutres aux couleurs pures, la luminosité[☆], correspondant aux caractéristiques photométriques de longueur d'onde dominante, de pureté et de luminance.

Mais les limites d'une telle acception doivent être posées d'emblée et laisser la possibilité d'une vision plus globale. Ainsi dans un environnement donné, l'identité de couleur de deux plages est estimée de la même manière par des observateurs différents : l'oeil est un instrument de comparaison. C'est un principe de base de la colorimétrie visuelle qui permet de se dégager du caractère subjectif d'une perception et de rechercher les lois générales de la vision des couleurs.

De plus, les phénomènes de contraste simultané[☆], et plus généralement les phénomènes perceptifs d'induction de couleurs, contredisent le point de vue simplificateur consistant à associer, dans une correspondance biunivoque, la composition de la lumière et la couleur perçue. Ainsi intégrer l'observateur humain implique de prendre en compte ces phénomènes visuels, même à un niveau élémentaire.

2. DESCRIPTION DE LA SEQUENCE

2.1. Introduction

2.1.1. Présentation

La séquence que nous décrivons ici se déroule sur une durée globale d'une quinzaine d'heures. Le découpage est fait selon cinq séances, chaque séance dure un ou plusieurs cours par tranche de deux heures (avec pause). Le rythme des cours, pour les étudiants, est de deux heures par quinzaine.

La description qui suit comporte pour chacune l'objectif d'ensemble. Nous donnons en encadré les textes écrits mis à la disposition des élèves, supports des activités et des questions proposées.

A cela s'ajoutent les éléments conceptuels et les éléments d'information qui peuvent, au choix du professeur et selon les groupes, être plus ou moins développés.

Tout le matériel qui sert de support à l'expérimentation par les élèves eux-mêmes a été construit par l'auteur, pour un travail par groupes de deux ou trois. Quelques indications techniques sont données en annexe II. Notons que les effets visuels sont d'autant plus contrastés que la salle est plus sombre.

A la fin de ce chapitre figure un tableau récapitulatif des épisodes du déroulement de la séquence ainsi que la situation dans le temps des points retenus pour une analyse plus détaillée faisant l'objet du « carnet de notes ». Le lecteur pressé peut donc s'y reporter dès maintenant, quitte à revenir en arrière pour plus de détail.

2.1.2. Préambule : propagation rectiligne et vision

Une séance préalable à la séquence, d'environ deux heures, est consacrée à des activités s'inspirant de celles décrites par W. Kaminski (1989) dans sa séquence d'optique élémentaire. Ces activités permettent de rappeler ou d'expliciter certaines propriétés de la lumière, telles que la propagation rectiligne en l'absence d'obstacle, la nécessité de recevoir de la lumière dans l'oeil pour voir quelque chose, que la lumière soit produite ou diffusée par les objets.

Il en va de même pour les ombres qui sont utilisées dans la suite de la séquence comme support pour l'étude de phénomènes colorés et dont les conditions de formation sont rappelées ici.

2.1.3. Questionnaire d'entrée

Un questionnaire a été proposé avant enseignement de la séquence dans certains groupes (voir annexe I). Comme il a été vu dans l'enquête préliminaire, les étudiants n'arrivent pas vierges de toute connaissance sur le sujet. Le questionnaire leur permet de faire eux-mêmes le point, il joue un rôle de mise en

appétit. Aucune réponse n'est apportée à ce moment-là, la séquence ayant cette fonction. Les réponses données par les étudiants seront reprises dans les chapitres suivants comme éléments de comparaison permettant de situer leurs acquis.

2.2. Phase 1 : poser le problème

Nous choisissons d'aborder le thème de la couleur par une situation de production de couleurs par addition de lumières colorées. Utilisée dans l'enquête préliminaire, cette situation, particulièrement simple à réaliser et très esthétique (ce qui est important pour ce public), permet de poser les questions sur la couleur qui déstabilisent les étudiants.

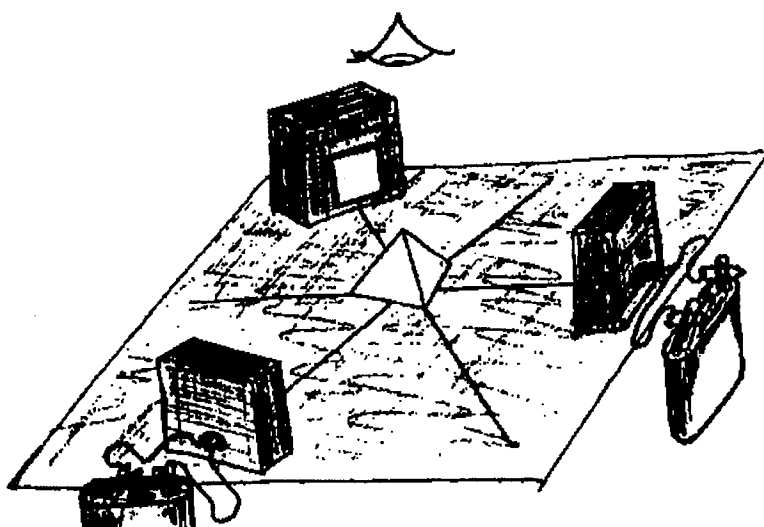
Toutes les situations décrites dans les encadrés 1 et 2 permettent d'introduire une analyse simplifiée de la composition de la lumière reçue par l'observateur et une mise en relation avec la couleur perçue.

2.2.1. Séance n°1 : produire et voir des couleurs

Les situations expérimentales proposées sont inspirées d'un article de Jouanisson : des lumières colorées à l'aide de filtres sont envoyées sur le papier blanc mat et diffusant d'un petit objet de forme tétraédrique (T) ou pyramidale à base hexagonale (H) (Jouanisson 1985).

L'activité proposée aux étudiants est une analyse des diverses situations où des couleurs sont observées. La verbalisation est suscitée par un jeu de questions sur lesquelles les étudiants engagent la discussion et produisent une réponse écrite par petits groupes. Les encadrés qui suivent sont mis à la disposition des étudiants mais, au cours de la séance, ils sont amplement commentés oralement en insistant sur les questions posées et sur une demande d'explicitation des réponses, soit sous forme verbale, soit sous forme de schémas.

Figure 1



Encadré 1

Produire et voir des couleurs**Matériel.**

On dispose de quatre sources de lumière blanche, de la lumière colorée peut être obtenue à l'aide de filtres. On dispose de filtres rouge, vert et bleu [RVB] et de filtres cyan, magenta et jaune [CMJ].

On a fabriqué des objets en bristol blanc, mat et diffusant : un tétraèdre T et une pyramide à base hexagonale H.

Ces objets peuvent tourner autour d'un axe de symétrie vertical passant par O, dessiné sur la base où sont représentées également des directions faisant des angles de 60° .

L'observateur se place à la verticale de O et il peut voir simultanément sur le même fond noir les diverses faces des objets.

1. Lumières colorées et couleurs observées.**1.1. Rouge, Vert, Bleu**

Placer les trois sources pour que chaque face de T soit éclairée de façon uniforme en lumières rouge, verte et bleue et paraissent également lumineuses. Sur un schéma, indiquer la position de T et les positions des sources.

Comment changer l'éclairage de chaque face, tout en les maintenant rouge, verte et bleue, c'est-à-dire sans changer la teinte ?

1.2. Produire d'autres couleurs

On cherche à produire d'autres couleurs : faire tourner T de 60° . Décrire les couleurs observées sur chaque face et proposer une analyse de la situation en vous aidant d'un schéma.

Quelles lumières reçoit l'observateur, lorsqu'il regarde la face jaune ?

2. Couleurs identiques.

Avec deux méthodes différentes, il est possible de rendre identiques deux faces de T, par exemple jaune, pour l'observateur toujours placé à la verticale. Utilisez les filtres de votre choix parmi les six filtres dont vous disposez. Réalisez l'expérience.

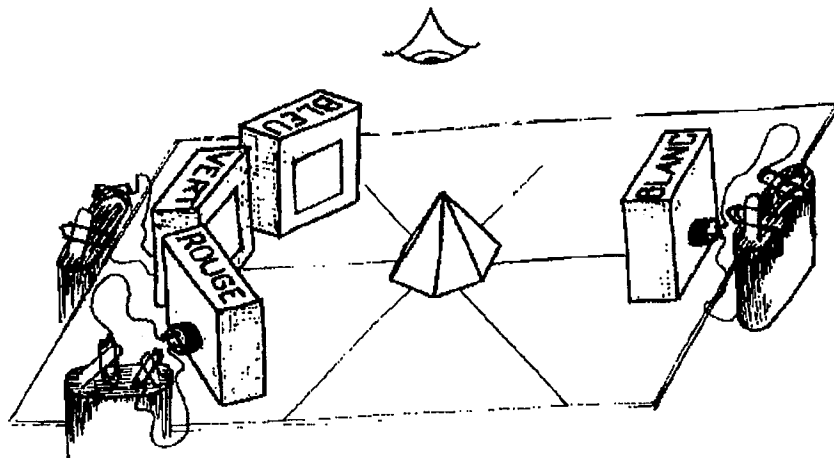
Faites un schéma de la situation en précisant les faisceaux lumineux qui parviennent sur chaque face et ceux que reçoit l'observateur.

A quel endroit se réalise l'équivalence des couleurs ? Précisez votre pensée sur le schéma et/ou à l'aide d'un commentaire.

Essayez avec d'autres couleurs...

Notez vos observations et la méthode utilisée pour produire une couleur.

Figure 2

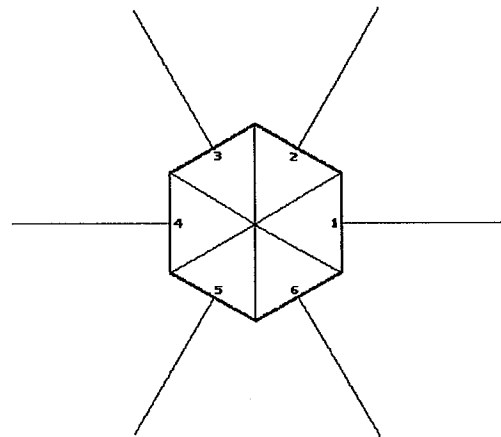


Encadré 2

3. Lumière blanche.

Mettez la pyramide sur la base et éclairez une face n°1 avec de la lumière blanche. Eclairez la face opposée n°4 de telle sorte qu'elle paraisse également blanche, en superposant les trois lumières colorées rouge, verte et bleue.

Faites un schéma du montage vu de dessus (position des sources, direction principale des faisceaux). Concluez.



4. Lumières de couleurs complémentaires.

4.1. Observation des faces latérales

Quels sont les faisceaux lumineux qui éclairent chaque face, lorsque les faces opposées n°1 et n°4 sont également blanches ? Décrivez plus précisément les couleurs observées sur les faces n°3 et n°5.

Faites varier l'ordre dans lequel sont disposées les trois sources et notez à chaque fois les couleurs observées sur les faces n°3 et n°5.

Comment interprétez-vous ces variations de teinte ?

4.2. Autres couples de couleurs complémentaires

Avec les filtres dont vous disposez, recherchez les **combinaisons de deux** filtres qui permettent de rendre identiques la face n°4 et la face n°1, toujours éclairée avec de la lumière blanche ? Récapitulez.

De tels couples de lumières colorées sont appelés *lumières de couleurs complémentaires*. Proposez une définition générale.

2.2.2. Commentaires

1. La lumière et ses propriétés

La première situation (voir figure 1 et encadré 1) invite à une analyse en termes de lumière : de la lumière est émise par la source et se propage entre la source et le papier ; la surface de papier est éclairée ; de la lumière est renvoyée par la surface du papier diffusant blanc dans toutes les directions et pénètre dans l'oeil de l'observateur.

On peut introduire ici les grandeurs photométriques associées à la quantité de lumière (flux lumineux F , éclairement E , luminance de la surface L) et faire le choix de l'une d'elle, la luminance, qui caractérise la quantité de lumière renvoyée par unité de surface dans une direction donnée. En faisant varier les conditions de l'éclairement de la face, c'est-à-dire en éloignant ou en rapprochant la source et en modifiant les orientations relatives des sources et des surfaces diffusantes, on fait varier la quantité de lumière diffusée vers l'observateur, c'est à dire la luminance de la face. On admet qu'avec le papier blanc, flux lumineux, éclairement et luminance sont proportionnels et que la teinte ne change pas.

Lorsque plusieurs lumières colorées (voir figure 2 et encadré 1) sont utilisées, chaque trajet peut être identifié, l'objet blanc diffuse toute lumière reçue et les lumières colorées sont juxtaposées jusqu'à leur entrée simultanée dans l'oeil, sans interaction entre elles.

2. Caractéristiques perceptives des couleurs

Les observations sur les couleurs sont d'abord l'occasion d'un consensus sur la dénomination des teintes (encadré 1, question 1). Dans l'espace perceptif, la couleur est décrite par le paramètre *teinte*, évoquée par les adjectifs rouge, vert...

De plus, les caractéristiques géométriques du dispositif sont telles qu'on peut faire varier par des actions simples le deuxième paramètre perceptif de la couleur : la *luminosité*, à laquelle se rapportent les adjectifs « clair » et « foncé » et qui dépend de la luminance de la plage.

3. La vision des couleurs

L'oeil est placé comme élément du montage, au terme de la chaîne (ici source → objet diffusant neutre → oeil) : il est le récepteur de lumière.

On souligne le fait que des lumières colorées superposées et arrivant simultanément dans l'oeil de l'observateur ne donnent qu'une seule réponse (encadré 2, question 1.2.) :

- « jaune » lorsque les lumières sont rouge et verte,
- « magenta » lorsqu'elles sont rouge et bleue,
- « cyan » lorsqu'elles sont verte et bleue.

L'oeil est également utilisé ici comme instrument de comparaison (encadré 2 question 2) : une même réponse perceptive peut correspondre à des compositions différentes de lumières reçues, et ceci quel que soit l'observateur.

4. Aspect technique : production de couleurs par synthèse additive

Cette situation est une introduction expérimentale au fait trichrome : trois lumières rouge, verte et bleue, considérées comme fondamentales, sont suffisantes pour permettre la production par addition de toute une gamme de couleurs. C'est le principe de la synthèse additive.

Une lumière de couleur quelconque peut être caractérisée par la proportion de chacune des lumières colorées fondamentales. Ces proportions dans la lumière résultante peuvent varier par une manipulation simple de la disposition des sources.

De même, la lumière blanche résulte de l'addition, dans des proportions convenables, de l'addition des trois lumières.

L'utilisation de la pyramide hexagonale (encadré 2, question 3) donne l'occasion d'observer et de définir des lumières de couleurs *complémentaires* par rapport à la lumière blanche : couples de lumières colorées dont l'addition redonne la même impression que la lumière blanche de référence, ainsi lorsque la face centrale est blanche, les deux faces latérales sont de couleurs complémentaires (par exemple bleu et orange).

On peut faire référence au principe de production des couleurs par les écrans de télévision et aux dispositifs de réglage des couleurs des logiciels de dessin assisté par ordinateur (DAO) ou « palette graphique ».

5. Une difficulté associée au langage

Bien que cette séance ne porte que sur l'addition de lumières colorées, le « rouge » et le « vert » gardent pour nos élèves le sens de pigments rouge et vert. On doit impérativement éviter le terme « *mélange de couleurs* » pourtant utilisé en colorimétrie (AFNOR) au sens de « mélange de lumières » et le remplacer par « *superposition ou mélanges de lumières colorées* ». Cependant cette précaution ne suffit pas pour lever les confusions. Ainsi la phrase : « *le mélange de rouge et de vert donne du marron* » est une affirmation si forte chez nos élèves que certains refusent de voir du jaune lors de l'addition des lumières rouge et verte, comme l'a montré l'enquête préliminaire.

Nous avons éliminé aussi le terme *primaire* qui renvoie, pour nos élèves, à des couleurs jaune, magenta et cyan, primaires de la synthèse soustractive[☆].

De même, l'observation des couleurs *complémentaires* doit permettre une distinction avec les couleurs complémentaires en peinture dont le mélange donne une couleur foncée, proche du noir.

6. Débat et consensus autour d'un diagramme fonctionnel

La multiplicité des schémas produits par les étudiants (voir exemples au chapitre 3) pour synthétiser leur point de vue sur l'analyse des situations expérimentales et leur conception de la vision amène un débat.

L'expérience montre qu'un accord s'établit facilement sur le diagramme de la page 62 qui semble traduire le maximum d'informations : c'est un diagramme

fonctionnel de type « chaîne » ; d'une part, il comporte une analyse en termes de lumière (qui se propage depuis la source jusqu'à l'objet et est diffusée par l'objet blanc jusqu'à l'oeil), et d'autre part il prend en compte la couleur comme une réponse perceptive où le cerveau joue un rôle.

2.3. Phase 2 : production de couleurs par soustraction

2.3.1. Séance n°2 : ombres colorées sur un écran blanc

1. Une activité de prévision

Déjà proposée dans l'enquête préliminaire, cette expérience classique, montrée dans les musées scientifiques, a produit la surprise chez nos élèves et ceci pour deux raisons. La première, apparue dans les discussions au cours des entretiens, est que les ombres, dans cette situation, sont colorées de teintes vives en contradiction avec la conception courante de l'ombre noire ou foncée.

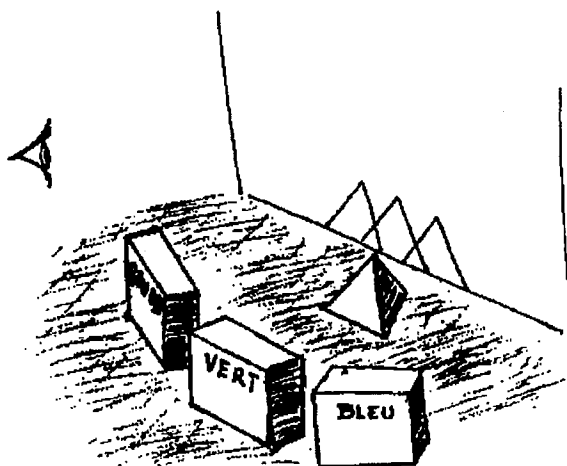
La seconde est que l'expérience permet d'observer et d'analyser le phénomène perceptif de *contraste simultané*[☆], que certains élèves repèrent. En effet, dans cette situation, et particulièrement avec une seule source, la couleur perçue ne peut pas être mise en relation de façon simple avec la composition de la lumière reçue.

Les outils conceptuels d'analyse des ombres colorées ont été introduits lors de la séance précédente :

- l'ombre d'un objet sur un écran est l'absence de lumière sur cette plage,
- là où s'ajoutent des lumières colorées, les lois perceptives de l'addition sont connues.

La prévision de l'aspect de l'écran (voir figure 3 et encadré 3) peut être menée avec ces seuls éléments.

Figure 3



Encadré 3

Ombres colorées sur un écran blanc**Prévision**

Placez le tétraèdre sur la base et les trois sources [RVB] au voisinage de la perpendiculaire à une face et dans l'ordre rouge, vert, bleu sans les allumer. Placez un écran blanc vertical derrière T à l'opposé des sources.

1 - Dessinez sur une feuille de papier blanc ce que vous pensez voir :

- si on allume la lampe rouge seule,
- si on allume la lampe verte seule,
- si on allume la lampe bleue seule.

2 - Que verrez-vous sur l'écran si on allume deux des lampes ? (rouge et vert par exemple)

Dessinez ce que vous pensez voir en précisant les différentes couleurs et les positions des ombres sur une feuille de papier blanc placée sur l'écran vertical.

3 - Que verrez-vous sur l'écran si on allume les trois lampes ? Dessinez ce que vous pensez voir (formes, positions et couleurs) en justifiant vos prévisions.

Observation et Vérification

1 - Allumez les trois sources. Vos prévisions sont-elles vérifiées ?

Faites un schéma et proposez une interprétation.

Modifiez l'ordre des lampes. Représentez les différentes combinaisons.

2 - Allumez deux sources.

Refaites un schéma (si l'observation ne correspond pas à vos prévisions) et proposez une interprétation de ce qu'on voit.

3 - Allumez une seule source.

Observez la couleur de l'ombre. Cette couleur est-elle en accord avec la lumière reçue par l'observateur, venant de cette plage ? Comparez avec la couleur de la source observée directement sur fond noir. Pouvez-vous donner une explication ?

Pour accentuer ce phénomène, faites une ombre de T avec la lumière rouge et éclairez l'écran avec une lumière blanche (mais la lumière ambiante suffit !).

Avec une source, une prise en compte de la disposition des éléments du montage est requise.

Avec deux sources de lumières colorées, il est nécessaire de raisonner en tenant compte de deux phénomènes :

- sur le fond, les lumières colorées venant de sources différentes s'ajoutent, sont diffusées par l'écran et parviennent dans l'oeil de l'observateur,
- pour chaque plage correspondant à l'ombre, l'une des lumières arrive alors que l'autre est arrêtée (ou *soustraite par l'obstacle*).

Lorsqu'on allume les trois sources, rouge, verte et bleue, correctement réglées, le fond paraît blanc. Chaque plage colorée de l'écran reçoit une ou deux lumières colorées.

2. Observation et interprétation

L'interprétation de la couleur d'une plage d'ombre de l'une des sources peut se faire selon deux modes de raisonnement : la plage jaune est celle qui reçoit et diffuse les lumières rouge et verte, mais c'est aussi celle où *manque la lumière bleue* par rapport au fond qui reçoit les trois lumières.

La lumière jaune est ainsi le résultat de la soustraction de lumière bleue dans la lumière blanche.

Cette expérience est l'occasion d'exercices de combinatoire additive et soustractive sur les lumières colorées reçues et diffusées par l'écran blanc.

3. Ombres et contraste simultané

Lorsque la prévision, l'observation et l'interprétation discutées en groupe ont convaincu chacun de la composition de la lumière qui provoque chaque couleur, une observation plus attentive des ombres obtenues, par exemple avec la lumière rouge et la lumière verte, montre que le « rouge » et le « vert » des plages vues sur fond jaune ne sont pas perçus de la même teinte que celle des filtres. Le « rouge » sur l'écran se nuance de bleu et apparaît plus « magenta » et le « vert » apparaît « cyan » (bleu vert).

Cet effet perceptif, appelé *contraste simultané*[☆] par Chevreul, est encore souvent qualifié d'illusion. Observé ici avec des lumières de couleurs vives et proches des complémentaires, il peut l'être aussi avec des lumières de couleurs moins contrastées (par exemple en lumière du coucher du soleil ou avec la flamme d'une bougie, les ombres sont bleutées), ou en noir et blanc avec des plages de clarté différente.

C'est une caractéristique générale de la perception des couleurs, commune à tous les observateurs humains, que l'on peut énoncer ainsi :

La couleur perçue d'une forme dépend de la couleur du fond sur lequel elle apparaît : le système visuel induit la couleur complémentaire du fond sur la plage visée.

Ainsi la composition de la lumière venant d'une plage donnée et reçue par l'observateur ne suffit pas à expliquer la couleur perçue pour cette plage. C'est une situation où l'intégration de l'oeil et du système visuel dans la chaîne d'analyse des informations sur la couleur est une nécessité.

2.3.2. Séance n°3 : analyse spectrale des lumières blanche et colorées

L'analyse de la lumière blanche ou colorée est faite grâce à l'observation du spectre obtenu avec un réseau. Les fentes sources sous cache-diapositive que nous utilisons ont déjà été décrites ¹, c'est pourquoi nous n'ajoutons pas d'encadré à ce propos.

L'essentiel est que les élèves puissent faire des observations simultanées du spectre de la lumière blanche de référence et des spectres des lumières colorées utilisées dans les séances précédentes.

L'observation et l'analyse des spectres permettent d'introduire les notions suivantes.

1. Lumière blanche, bandes spectrales et couleurs spectrales

Les lumières rouge, verte et bleue correspondent chacune à une bande spectrale d'un tiers environ du spectre de la lumière blanche. L'addition des trois spectres de ces lumières redonne celui de la lumière blanche, ce qui justifie le découpage simplifié en trois bandes.

La décomposition de chacune de ces bandes larges en bandes de plus en plus étroites conduit à la notion de radiation monochromatique, caractérisée par une valeur de longueur d'onde. Chacune d'elle produit sur l'observateur une sensation de couleur différente, qualifiée de couleur spectrale ou pure, allant du violet (400 nm) au rouge (700 nm).

2. Le rôle du filtre

Le filtre est un objet transparent qui *soustrait* une partie des radiations contenues dans la lumière blanche. La soustraction ici a pour origine le phénomène d'absorption sélective liée à la structure du matériau utilisé.

Un matériau transparent coloré est caractérisé par sa courbe de transmission spectrale indiquant la variation du facteur de transmission spectrale T (rapport du flux transmis au flux incident) en fonction de la longueur d'onde.

3. Le fonctionnement de l'oeil et du système visuel pour la perception des couleurs

A une bande de radiations (large ou étroite), correspond une seule réponse perceptive. Mais si à un spectre correspond une couleur donnée, la réciproque n'est pas vraie, une même couleur peut correspondre à plusieurs spectres. Ainsi, la perception de jaune peut résulter soit d'une radiation monochromatique, soit de

1. UTRILLA J.P., 1988, Que la lumière soit, et la lumière fut, *BUP* n° 703, p. 501-504 ou GOUBE A. et LEGRAND J.F., 1987, Couleurs et spectres d'absorption, *BUP* n°693, p. 509-513.

l'addition de deux radiations monochromatiques rouge et verte, soit d'une bande large et continue de radiations allant de 500 à 700 nm, ou bien encore de bandes plus ou moins larges ou discontinues comprises dans le même domaine.

4. Le spectre d'une lumière et la couleur perçue

Un jeu de superposition de filtres de couleurs différentes permet de faire des prévisions qualitatives, en raisonnant sur des soustractions successives de bandes de radiations par rapport à la lumière incidente. La couleur perçue correspond à la bande transmise et reçue par l'observateur.

5. La superposition de filtres identiques et la saturation[☆] de la couleur

La superposition de matériaux identiques transparents (feuilles teintées pour rétroprojecteur par exemple) sur la même fente source en une, deux, trois et quatre épaisseurs montre comment varie le phénomène d'absorption avec l'épaisseur traversée par la lumière.

L'étude quantitative simplifiée (chaque épaisseur de filtre absorbe la même proportion de la lumière incidente pour une bande spectrale donnée) et l'observation des spectres sont mis en relation avec l'évolution de la couleur perçue.

Une seule épaisseur laisse passer de la lumière sur l'ensemble du spectre ce qui donne une couleur lavée de blanc, c'est-à-dire *désaturée*. Lorsque plusieurs feuilles sont superposées, la largeur de la bande spectrale transmise diminue en même temps que s'accroît le contraste entre la bande lumineuse et la bande sombre : la couleur perçue est plus *pure*.

Cette observation permet l'introduction du troisième paramètre perceptif de la couleur : la *saturation*[☆], les deux premiers étant la teinte et la luminosité.

Des adjectifs, tels pur, saturé, lavé de blanc, vif = clair et saturé, pâle = clair et lavé, profond = foncé et saturé, rabattu = lavé et foncé, sont mis en relation avec les spectres observés.

A l'issue de cette séance, les caractéristiques de la couleur perçue sont à nouveau liées principalement à la composition de la lumière reçue. Une analyse plus détaillée indique comment varient les paramètres perceptifs de teinte, saturation et luminosité avec les quantités relatives des différentes bandes de radiations.

2.3.3. Séance n°4 : couleurs des objets opaques

1. Action sur la lumière : analogie pigment et filtre

Pour provoquer un déplacement de la notion de couleur considérée par les élèves comme seule propriété de la matière, tout en prenant en compte leurs connaissances sur le mélange des pigments, nous avons choisi de montrer l'analogie de l'action sur la lumière blanche d'un corps opaque et d'un filtre de même teinte.

Pour cette séance, les élèves disposent de morceaux de filtres colorés utilisés en éclairage de scène ; les teintes sont choisies très proches de celles des pigments *primaires* de la palette du peintre.

Les spectres des lumières transmises par les filtres jaune, magenta et cyan ont été caractérisés comme couvrant les deux-tiers du spectre visible. Il en va de même pour les lumières diffusées par les pigments, ce qui peut être observé directement, si on dispose d'un spectroscope à main.

Sinon, lorsqu'on superpose les filtres deux à deux et lorsqu'on mélange les pigments deux par deux, on observe les mêmes teintes². Dans chaque cas, la lumière reçue par l'observateur ne comporte plus que le tiers de la bande spectrale visible, ce qui correspond aux couleurs fondamentales rouge, vert et bleu.

Cette équivalence phénoménologique, en référence à la perception visuelle, amène à proposer un même modèle de fonctionnement par rapport à la lumière, pour les corps colorés transparents et opaques :

- la lumière blanche pénètre dans le matériau,
- le matériau transforme la lumière reçue,
- il soustrait totalement ou partiellement une bande de radiations qui lui est caractéristique ; c'est l'absorption sélective,
- il diffuse ou transmet le reste qui est reçu par l'observateur.

L'action de soustraction sur la lumière blanche, caractéristique de chaque pigment, peut être traduite par une courbe de réflexion spectrale ($R = f(\lambda)$) où le facteur de réflexion R (rapport du flux lumineux réémis au flux lumineux incident) est mesuré pour chaque bande spectrale.

L'analyse spectrale est introduite non pour avoir des informations sur la nature du matériau, mais pour caractériser l'action du matériau sur la lumière.

2. Lois de la synthèse soustractive

Les lois générales des mélanges de pigments et de colorants sont alors mises en relation avec la composition de la lumière reçue par l'observateur : les mélanges sont moins lumineux que chacun des pigments, la teinte et la saturation évoluent en fonction de la position et de la largeur de la bande spectrale restant après soustraction par chaque pigment du mélange.

Ce sont les lois de *la synthèse soustractive*[☆]. On comprend pourquoi les pigments primaires choisis par les peintres ou les encres des imprimeurs (jaune, magenta ou cyan) laissent passer deux tiers du spectre, alors que des pigments rouges, verts et bleus, ne laissant passer qu'un tiers du spectre et mélangés deux à deux, donnent une couleur très sombre, proche du noir.

2. On néglige, pour les filtres, la lumière diffusée par le filtre superficiel, et pour les pigments, la lumière qui n'est transformée que par un type de pigments.

3. Retour sur la diffusion par les corps opaques

Une activité de prévision (encadré 4) est proposée pour permettre un réinvestissement de l'idée de diffusion par un écran coloré (papier teinté par un pigment ou un colorant) de la lumière colorée de même couleur. Cette notion de diffusion, sur laquelle nous insistons, est suffisante pour donner la bonne réponse, le phénomène d'absorption sélective pouvant être explicité dans les justifications.

Les couleurs des papiers étant peu saturées et la salle d'expériences n'étant pas obscure, nous demandons une analyse en termes de luminosités comparées (clair ou foncé), donc de contraste et non de teinte.

On évite ainsi des réponses justes, mais obtenues avec des raisonnements faux où les couleurs sont ajoutées, comme s'il s'agissait de pigments : par exemple, « rouge + bleu = violet », si l'écran bleu est éclairé en lumière rouge. Dans les faits, un peu de lumière rouge est diffusée par le papier bleu, de la lumière bleue est également diffusée provenant de la lumière ambiante : le papier apparaît magenta foncé, peu différent du violet.

Eclairés par une lumière rouge, la face avant du tétraèdre et l'écran rouge ont des luminosités fortes, l'ombre du tétraèdre apparaît très sombre : le contraste est fort entre la zone éclairée et la zone d'ombre. De plus, si l'écran est placé de telle sorte que la lumière qu'il diffuse atteigne les faces arrière du tétraèdre, ces faces ont également des luminosités fortes.

Au contraire, la lumière rouge, éclairant un écran bleu, est absorbée par le papier bleu, l'écran et l'ombre présentent peu de différence : le contraste est faible. Les faces arrière du tétraèdre ne sont pas éclairées.

L'observation brute, dans des conditions de réalisation peu favorables, risque de renforcer les raisonnements faux. Il apparaît d'autant plus important d'avoir mené, avant vérification, une analyse en « tout ou rien », qui pourra être nuancée ensuite devant l'observation de l'expérience.

Encadré 4

Diffusion par les corps opaques Ombres sur un écran coloré

On éclaire avec une lumière colorée l'objet blanc T placé devant un écran coloré. On compare maintenant, sur l'écran, la luminosité de l'ombre de T par rapport au reste de l'écran (la face éclairée de l'objet T sert de référence).

* Prévisions

a - l'écran, noir à la lumière du jour, est éclairé en lumière rouge.

Verra-t-on nettement l'ombre sur l'écran ? oui non

Expliquez :

.....

.....

b - l'écran, rouge à la lumière du jour, est éclairé successivement avec une lumière rouge, verte ou bleue. Dans chaque cas, prévoir la luminosité (forte ou faible) des deux zones de l'écran, et indiquer si leur contraste est fort ou faible.

Lumière	Zone éclairée	Zone d'ombre	Contraste
rouge			
verte			
bleue			

Justifiez votre réponse :

.....

.....

.....

* Vérifications

Faites l'expérience. Notez vos observations et commentez. Comment un objet opaque coloré agit-il sur la lumière qu'il reçoit ?

.....

.....

.....

2.4. Phase 3 : réinvestissement et activité de synthèse

2.4.1. Séance n°5 : couleur des objets en lumière blanche et colorée

La couleur des objets de notre environnement quotidien est une propriété attribuée à l'objet éclairé en lumière blanche. Elle est mémorisée et perçue comme constante, indépendamment de la qualité de cette lumière, pourtant variable au cours de la journée. Ce phénomène, décrit par les psychologues sous l'appellation « *constance[☆] de la couleur* », contribue à renforcer l'idée que la couleur est une propriété de l'objet.

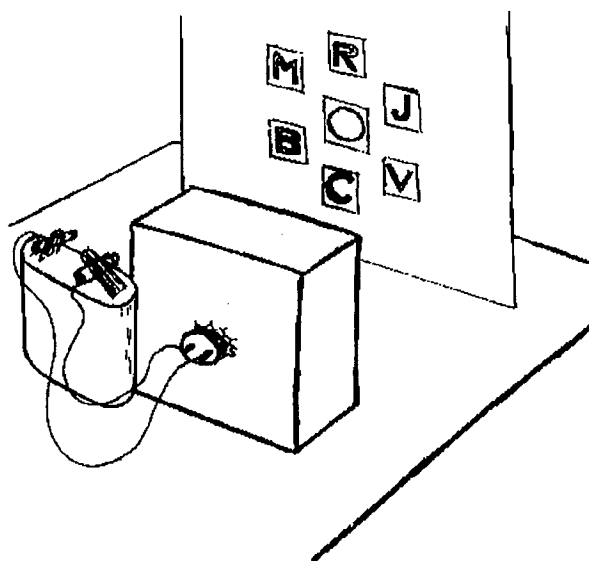
L'objectif de cette séance est de rendre explicite l'influence de chaque facteur dans la couleur perçue des objets : le rôle de la lumière incidente, qui peut être de la lumière colorée, la nature de l'objet et son interaction avec la lumière, la lumière reçue par l'observateur et la couleur perçue.

L'activité proposée est une prévision de ce qu'on verra, donc nécessite de réinvestir les notions relatives au concept de couleur acquises au préalable. Elle se présente comme un exercice de synthèse où il faut maîtriser tous les éléments de la chaîne pour donner la bonne réponse.

L'exercice (figure 4 et encadré 5) consiste d'abord en une prévision mettant en jeu un raisonnement que les étudiants sont invités à expliciter verbalement ou à l'aide de schémas.

Chaque lettre de 1,5 cm environ est découpée en papier réfléchissant recouvert d'un filtre (film autocollant pour impression) de couleur le plus saturée possible, absorbant un ou deux tiers du spectre. Toutefois, comme dans l'expérience précédente, l'absorption sélective ne se fait pas par tout ou rien. Les conditions difficiles de réalisation (absence totale de lumière dans la salle, obtention de couleurs saturées) nous amènent à poser la question en termes : « visible ou non visible », en référence à la lumière diffusée et reçue par l'observateur.

Figure 4



Encadré 5

Couleur des objets en lumière blanche et en lumière colorée
Tableau coloré sur fond noir

On observe sur le tableau noir, éclairé en lumière blanche, des objets (lettres) de couleurs Rouge, Jaune, Vert, Cyan, Bleu, Magenta et un rOnd blanc.

*** Prévion : que verra-t-on ?**

a - si on éclaire le tableau avec de la lumière ROUGE,

lettres visibles : ; non visibles :

b - même question pour les lumières suivantes :

lumière	lettres visibles	non visibles
VERTE		
BLEUE		
JAUNE		

c - sur un exemple de votre choix, proposez un schéma traduisant la chaîne des transformations subies par la lumière et justifiez votre réponse.

*** Vérifications et conclusions**

lumière	lettres visibles	non visibles
VERTE		
BLEUE		
JAUNE		

.....

2.4.2. Un raisonnement utilisant tous les éléments de la chaîne

Pour une prévision correcte, un raisonnement en termes de lumière est nécessaire, fondé sur la composition de la lumière reçue par l'observateur après deux absorptions successives : par le filtre, puis par l'objet.

Les paramètres variables dans cette question sont la composition simplifiée de la lumière incidente et la composition de la lumière diffusée après interaction avec l'objet.

Pour éviter des raisonnements en termes d'addition de couleurs, comme s'il s'agissait de pigments, qui ne permettent pas d'évaluer le niveau de compréhension, la question est posée d'abord en termes de luminosité.

2.4.3. Vérification et observation

L'analyse permet de prévoir non seulement la luminosité mais également la teinte perçue. La vérification, satisfaisante dans de bonnes conditions d'obscurité, paraît suffisamment convaincante pour valider le raisonnement en termes de lumière. Ce même raisonnement permet aussi l'explication des écarts entre prévision et vérification, lorsque la lumière blanche ambiante joue un rôle non négligeable.

D'autres types d'exercices de réinvestissement peuvent être inventés. Une analyse critique de textes de vulgarisation scientifique ou technique (séance 6) a été expérimentée à partir d'un article extrait du journal « Le Monde » sur l'impression en couleur (voir annexe II). L'analyse trichrome d'une image à reproduire est, dans ce cas, la situation qui sert de support expérimental. D'autres applications sont centrées sur une maîtrise raisonnée des outils de définition de la couleur dans les logiciels de dessin assisté par ordinateur.

3. CONCLUSION

Le concept de couleur proposé dans cette séquence fait une place toute particulière au système visuel de l'observateur qui est intégré dans une chaîne de transformations de l'information sur la couleur transportée par la lumière.

Le découpage, l'ordre d'introduction et les aides proposées sous forme de questions de prévision devant dispositifs expérimentaux, pour observer et analyser des phénomènes, sollicitent une participation active des étudiants.

De plus, chaque étape faisant appel à des outils conceptuels mis en place au cours des séances précédentes, les élèves sont en mesure de parvenir à un certain sentiment de réussite.

Le fait qu'on puisse rendre compte d'expériences variées avec peu de lois permet de mettre en évidence la cohérence de la description, et par là de renforcer la confiance des élèves en eux, lorsqu'ils abordent de nouvelles situations.

C'est du moins ce que nous attendions en mettant en place cette séquence. Il reste à voir ce qu'en ont retiré les étudiants.

CHAPITRE 3

CARNET DE NOTES

La séquence a été mise en oeuvre deux années de suite, sur cinq groupes chaque année, dans différentes sections de techniciens supérieurs d'arts appliqués, dont les programmes de sciences appliquées comportent une partie d'optique relative à la couleur (voir annexe IV).

En cours de séquence, nous avons cherché à savoir comment les élèves s'approprient les concepts introduits et comment ils peuvent les réinvestir à différents moments dans l'analyse de situations voisines de celles qui ont été proposées. Ceci nous a permis de dégager des éléments critiques dans les situations présentées. On constate en effet, chez les étudiants, des degrés d'acceptation divers et également une persistance de certaines difficultés.

Pour recueillir des informations, nous avons utilisé, entre autres, le questionnaire papier-crayon et les prévisions écrites et rédigées individuellement ou par petits groupes avant observation, en cours de séquence. Les réponses seront notées sous l'étiquette « **en cours** ».

Certaines questions ont fait partie soit du questionnaire d'enquête préliminaire (voir chapitre 1), soit d'un questionnaire proposé à certains groupes préalablement à tout enseignement (voir chapitre 2 et annexe I). Les réponses à ces questions sont notées sous le label « **avant** » et permettent alors des comparaisons. Elles ne concernent pas toutes le même groupe. En effet, il n'est pas toujours possible de poser les mêmes questions aux mêmes élèves dans des délais trop brefs, et surtout de leur demander un travail de rédaction, sans risque de lassitude et de démotivation.

Nous ajoutons alors, selon les cas, des éléments d'information concernant les groupes concernés. Il s'agit alors généralement d'un groupe différent que nous considérons comme équivalent non seulement par les connaissances mais aussi par le profil général, les attentes et les motivations.

Le degré d'acceptation de la séquence elle-même, de façon plus globale et sur un plan psychologique, a été évalué à la fin, par le biais d'un questionnaire d'attitude. La prise en charge de la séquence par une autre enseignante nous a permis de poser ce questionnaire dans trois groupes d'étudiants, l'un ayant travaillé avec cette enseignante et deux autres avec l'auteur. Quelques éléments d'information recueillis et choisis parmi les plus significatifs par rapport aux objectifs de la séquence sont rassemblés dans l'annexe III.

1. MISE EN PLACE DES CONCEPTS FONDAMENTAUX : DEGRE D'ACCEPTATION ET DE REINVESTISSEMENT

1.1. Première séance : quels effets ?

1.1.1. Les éléments conceptuels visés

Dès la première séance, pratiquement tous les éléments conceptuels sont introduits à partir des outils que sont la propagation rectiligne et la diffusion par un écran blanc de toutes les lumières reçues. Seule la production de couleur par synthèse soustractive n'est pas abordée. Il s'agit là d'éléments fondamentalement nouveaux pour les élèves et à la base de la construction du concept de couleur.

Les objectifs sont les suivants :

- le concept de lumière colorée, lumière qu'on ne voit pas se propager dans l'espace mais qui provoque la sensation de couleur lorsqu'elle parvient dans l'oeil ;
- le rôle de l'oeil : récepteur de lumière ;
- mais également le rôle intégrateur du système visuel : deux lumières colorées juxtaposées ou superposées produisent une nouvelle couleur ;
- la propagation de ces lumières indépendamment les unes des autres ;
- les lois d'addition des lumières colorées fondamentales.

1.1.2. Des questions sur l'effet de la première séance

Comment les observations ont-elles été mémorisées ? Qu'en reste-t-il quinze jours ou un mois après ? Comment les élèves se sont-ils approprié les notions utilisées dans l'interprétation des observations ?

Pour répondre à ces interrogations nous avons posé un jeu de questions au début de la séance suivante.

La première question cherche à évaluer le degré de mémorisation, la deuxième celui de l'acceptation du rôle de l'oeil. La troisième question nécessite un « saut » conceptuel. Elle porte sur l'existence d'un lien à établir, celui de diffusion, entre les situations « lumières colorées » introduites au cours de la première séance, et les situations « objets colorés », non encore abordées.

La consigne donnée en début de séance est de répondre individuellement et par écrit aux trois questions.

Les résultats indiqués à partir d'ici et dans toute la suite de la thèse concernent des groupes d'effectifs réduits. Nous les présentons sous forme de pourcentages par commodité, mais sans aucune prétention statistique (un étudiant représente environ 5% de l'effectif d'une classe).

1.2. Addition de lumières : mémorisation ?

1.2.1. La question : synthèse additive

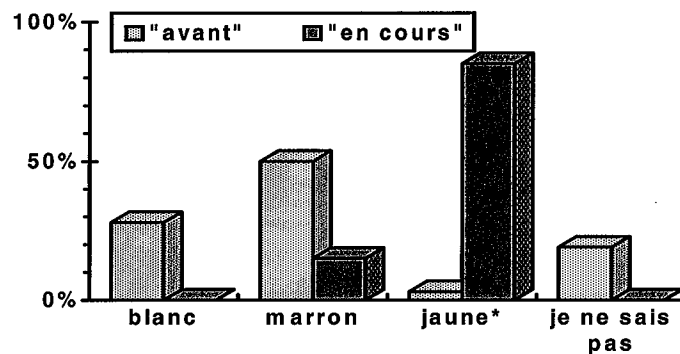
Le groupe St-A répond à la première question qui se réfère à une situation explicitement traitée au cours de la première séance et a fait l'objet d'une discussion de groupe. Les réponses de ce groupe seront notées « en cours ». Sur les 23 présents, 20 seulement l'étaient à la séance précédente. Nous rappelons ici, comme éléments de comparaison, les résultats de l'enquête préliminaire, notés « avant » (la même question a été posée au groupe de MÀN St Rémy, voir chap. 2)

Q2.1. Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte. Qu'observe-t-on, là où les faisceaux se superposent ?

1.2.2 Les réponses

	du blanc	du marron	du jaune *	du rouge et du vert	je ne sais pas
« avant » (N = 60)	17 (28 %)	30 (50 %)	2 (3 %)	6 (10 %)	5 (9 %)
« en cours » (N = 23)	0	3 (15 %)	19 (85 %)	0	1 (5 %)

* réponse correcte

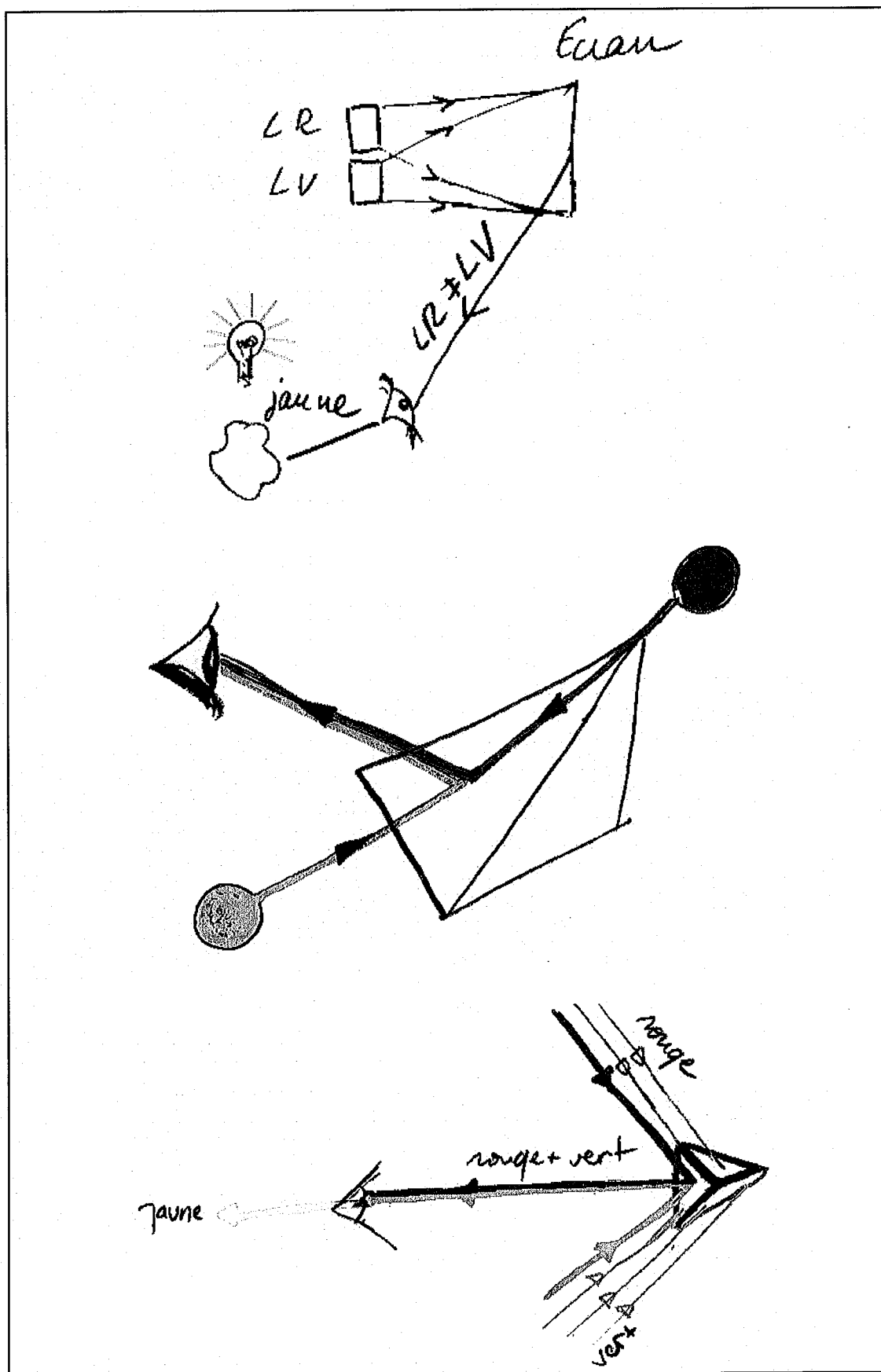


Les seuls à ne pas avoir donné la réponse correcte sont les absents à la séance précédente.

1.2.3. Points marquants

Les réponses correctes et massives montrent que la mémorisation des lois de l'addition de lumières présente peu de difficultés, pour tous ceux qui ont fait l'observation.

Encadré 1



1.3. Rôle de l'oeil et du cerveau dans la perception de la couleur : acceptation ?

1.3.1. Une situation déstabilisante qui fonctionne

Lors de la première séance, la situation d'addition de lumières rouge et verte avait été introduite non seulement pour en apprendre le résultat, mais surtout comme déclencheur potentiel d'une nouvelle interprétation de la couleur : celle d'une réponse perceptive à la lumière. Cette attente, qui reposait au départ sur les constatations de l'enquête préliminaire, s'est révélée justifiée. La situation a provoqué effectivement des débats : les éléments de questionnement et de raisonnement manifestés dans les entretiens préliminaires (chap. 1, §2) sont apparus. Un accord sur l'analyse de la situation s'est établi en fin de première séance.

A titre d'information complémentaire, et pour illustrer l'efficacité de la situation proposée, l'encadré précédent figure les schémas que les étudiants d'un autre groupe avaient produits à l'issue de cette première séance pour résumer leurs discussions (par trois ou quatre étudiants). On y observe, sous des formes variées, que la superposition des deux lumières produit dans l'oeil la sensation de jaune.

La diversité observée et l'imagination dans ces schémas traduisent une reformulation et manifestent une appropriation par les élèves de l'idée de chaîne de transport d'information par la lumière et de l'idée de couleur comme réponse perceptive.

1.3.2. Appropriation individuelle

La seconde question énoncée ci-dessous vise à contrôler l'appropriation individuelle de cette interprétation quelque temps après. Pour le groupe interrogé dans ce jeu de trois questions, la première séance s'était seulement terminée sur une discussion sans production de schémas, mais manifestant la même adhésion d'ensemble à l'interprétation visée. Les réponses d'un troisième groupe « avant », interrogé avant tout enseignement et pour le même question, sont indiquées à titre de comparaison.

1. La question

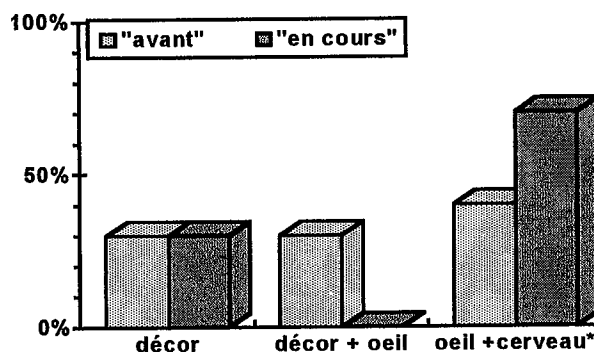
Q2.2. Où se crée cette couleur ?

- | | |
|---|--------------------------|
| dans l'espace, là où les faisceaux se rencontrent | <input type="checkbox"/> |
| sur le décor | <input type="checkbox"/> |
| dans l'oeil de l'observateur (sur la rétine) | <input type="checkbox"/> |
| dans le cerveau de l'observateur | <input type="checkbox"/> |

2. Les réponses

	décor /espace	décor /oeil	oeil/ cerveau*
« avant »	30%	30%	40%
« en cours »	30%	0%	70 %

*réponse correcte



3. Les schémas et commentaires associés

Dans les réponses données à cette question, les schémas sont plus instructifs que les commentaires écrits. Ceux-ci peuvent être en effet corrects mais incomplets, cette insuffisance pouvant apparaître comme anodine. Il est sans doute plus significatif qu'un schéma soit incomplet par rapport à l'exigence d'interprétation posée ici, à savoir tenir compte du système visuel.

Nous indiquons dans le tableau suivant les types de schémas et les commentaires associés qui peuvent se classer en 4 catégories selon les éléments de la chaîne qui y sont repris.

Sur les schémas de type 1, les élèves représentent les deux lumières rouge et verte arrivant ensemble dans l'oeil de l'observateur, et également le système visuel.

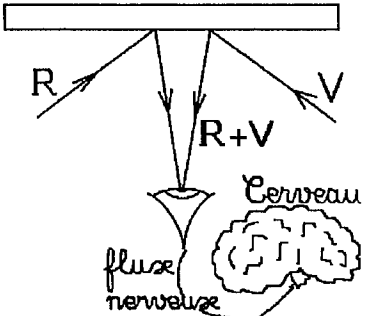
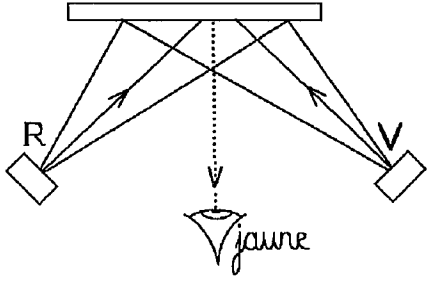
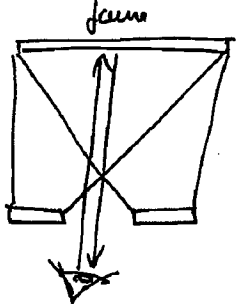
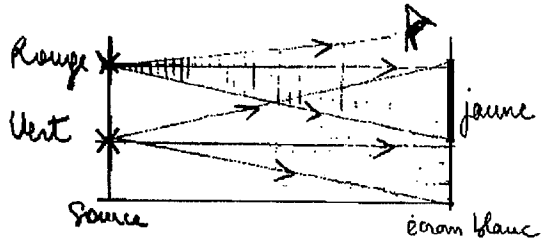
Sur les schémas de type 2, de la lumière arrive dans l'oeil, sans que soit précisé s'il s'agit de la juxtaposition des deux lumières colorées.

Sur les schémas de type 3, les lumières rouge et verte arrivent sur le décor. L'oeil y est figuré, et semble disposer d'un rôle actif : une flèche part de l'oeil vers le décor (avec ou sans flèche opposée).

Sur d'autres schémas (type 4), de la lumière arrive sur le décor, mais aucun trajet d'information ne figure au delà du décor. D'ailleurs l'oeil lui-même n'est pas toujours figuré.

Chaque type de schéma correspond à un quart environ de l'effectif, les réponses brutes correctes (70%) pouvant être associées à l'un des trois premiers types de schémas.

Tableau : « Où se crée cette couleur ? »

schémas	commentaires associés
<p>1. 25%</p> 	<p>« l'oeil est le récepteur, le cerveau voit jaune » (St-A1)</p> <p>« l'oeil interprète la superposition (R+V) en jaune et envoie l'information au cerveau » (St-A14)</p>
<p>2. 25 %</p> 	<p>« le jaune est la lumière qu'on reçoit. C'est l'oeil qui fait le mélange » (St-A8)</p>
<p>3. 25 %</p> 	<p>« l'oeil aperçoit la réunion des deux faisceaux vert et rouge, c'est transmis au cerveau et une fois le message perçu dans le cerveau, l'oeil voit du jaune » (St-A9)</p>
<p>4. 25 %</p> 	<p>« le jaune se crée grâce à la juxtaposition des deux faisceaux lumineux, visible sur l'espace blanc du décor » (St-A10)</p>

1.3.3. Points marquants

Cette situation centrée sur l'addition des lumières rouge et verte a été choisie pour introduire presque tous les concepts essentiels à la compréhension de la couleur et notamment l'interprétation de ce phénomène comme réponse perceptive. Elle a fonctionné comme prévu à l'échelle des débats de groupes.

L'appropriation individuelle, contrôlée à la séance d'après, semble notable : la grande majorité des élèves citent l'oeil et le cerveau, le plus souvent avec des arguments qui mentionnent les éléments de la chaîne de transport d'information jusqu'à l'oeil et le cerveau.

On peut observer que les éléments conceptuels introduits dans la première séance se trouvent ainsi repris dans les réponses des élèves. En effet, la production de schémas relativement élaborés et adaptés à la situation permet de penser qu'il ne s'agit pas d'une simple répétition, en réponse à l'attente du professeur.

1.4. Diffusion et couleur : un « saut » conceptuel

1.4.1. Double rôle de la question

La troisième question a une double fonction : elle permet, d'une part, d'étudier le réinvestissement des éléments conceptuels introduits au cours de la séance sur l'addition de lumières ; elle est, d'autre part, utilisée pour maintenir la motivation des élèves et susciter leur participation.

En effet, si la diffusion de lumières colorées par l'écran blanc a été introduite et utilisée pour produire de nouvelles couleurs, en revanche rien n'a été dit sur l'idée qu'un écran coloré effectue un tri par rapport à la lumière blanche, ne renvoyant que la lumière de même couleur.

Il est donc demandé aux élèves un véritable « saut » conceptuel. Comment peuvent-ils **concevoir la diffusion** de lumière colorée par un objet coloré de même teinte, éclairé en lumière blanche ? Quel lien peuvent-ils établir entre lumière colorée et couleur des objets à ce moment-là ?

Avoir manipulé, concrètement et au niveau des concepts, des lumières colorées rend-il possible l'émergence de l'idée de **tri associé à l'absorption sélective** par l'écran coloré ?

La même question a été posée dans le questionnaire d'entrée à un groupe équivalent (N = 22) ; les résultats sont notés « avant ».

1.4.2. La question : diffusion et couleur

Q4. Entrant dans une salle sombre, un spectateur peut-il faire la différence entre un décor rouge éclairé par une lumière blanche et un décor blanc éclairé en lumière rouge ?

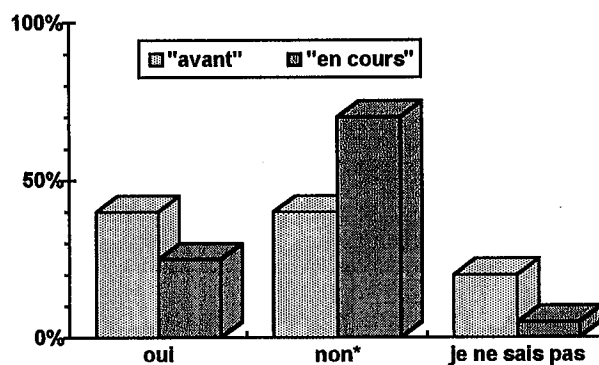
oui non je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

1.4.3. Les réponses

	oui	non *	je ne sais pas
« avant » (N = 22)	40 %	40 %	20 %
« en cours » (N = 23)	25 %	70 %	5 %

* réponse correcte



1.4.4. Analyse des justifications

Les commentaires (que la réponse soit oui ou non) sont classés en trois catégories présentées dans le tableau de la page suivante. Sont indiqués également les pourcentages de chaque type de justifications « avant » et « en cours » d'enseignement.

Tableau comparatif des justifications

« avant »	« en cours »
1. lumière ou « couleur » renvoyée vers l'oeil	
5% non, « il reçoit sur la rétine la même couleur rouge »	35% non, « le support réfléchit la lumière. Dans les deux cas c'est rouge » « l'oeil recevra la même information » « l'écran blanc renvoie la lumière rouge, l'écran rouge renvoie la couleur rouge de l'écran »
2. l'idée de lumière colorée diffusée est partiellement reprise	
0%	35% (15%) non, « l'oeil additionne les deux couleurs, le décor rouge renvoie la lumière blanche + le rouge du décor » « l'oeil fait la synthèse du décor et de la lumière » (20%) oui, « lorsqu'un écran est éclairé par une lumière blanche, sur le rouge, c'est blanc. Par contre si on éclaire du rouge sur un fond blanc, la lumière sera rouge car le blanc diffuse la couleur »
3. la lumière agit sur le décor, pas de lumière diffusée, pas d'oeil	
55% (20%) oui, « la lumière agit sur l'intensité de la couleur » « il verrait une différence d'intensité, peut-être que le décor rouge serait plus lumineux » « la lumière rouge assombrit plus la couleur que la lumière blanche, qui, elle, a tendance à l'éclaircir » (35%) non, « il ne verra pas de différence, c'est le même mélange »	20% (5%) oui, « il y aura une modification de la densité de la couleur » (15%) non, « la lumière colorée donne sa couleur au décor blanc, de même pour un décor rouge, la lumière va raviver le décor rouge »
4. sans justifications ou autres	
40%	10%

Parmi ces trois catégories, les deux premières ont ceci de commun qu'elles manifestent la présence d'éléments d'analyse de la situation en termes de chaîne, ici lumière diffusée et prise en compte de l'oeil.

Type 1

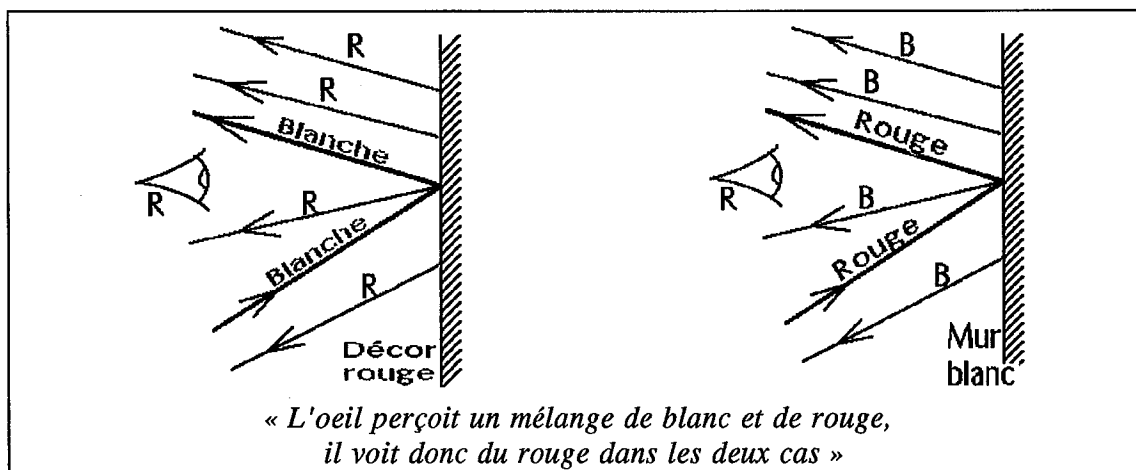
La lumière arrive sur le décor, de la lumière ou de la « couleur » est renvoyée vers l'oeil de l'observateur, y produisant la même sensation dans les deux cas.

Type 2

Pour un deuxième groupe d'étudiants, qui placent parfois l'oeil dans le dispositif, la « couleur » du décor se transmet à l'oeil de l'observateur, l'idée de diffusion de lumière par un écran est présente, mais se manifeste d'une façon qui laisse des doutes. Deux modalités apparaissent :

- soit la diffusion de lumière rouge par le décor rouge n'est pas exprimée,
- soit il apparaît une sorte de contribution additive propre à l'écran. C'est ce qu'indiquent les schémas et le commentaire suivants :

Encadré 2



Type 3

Pour d'autres, la lumière arrive sur le décor, mais n'est pas renvoyée vers l'observateur, la diffusion de lumière par l'écran blanc n'est pas une connaissance mobilisée. On mentionne seulement le fait que la lumière modifie la luminosité de la plage éclairée.

1.4.5. Points marquants

Les justifications des réponses, avant et en cours de séquence, comportent des argumentations très différentes. Cela montre une nette avancée dans l'acceptation de l'idée de chaîne, puisque, de 5 % avant enseignement, le taux de réponses qui mentionnent des éléments de cette chaîne passe à 70 % (types 1 et 2).

Les exemples de commentaires cités montrent aussi que le terme « couleur » est utilisé fréquemment pour « lumière colorée », ce qui est à la fois un indice d'un déplacement de l'association forte couleur-matière et le signe d'une maîtrise conceptuelle encore incomplète.

L'idée d'un tri par l'écran coloré n'est invoquée que dans un tiers des réponses (type 1). Le terme d'« absorption » de lumière n'est jamais utilisé.

1.4.6. De nouvelles interrogations chez les étudiants

Il est intéressant de noter un effet d'un autre ordre, obtenu à propos de cette question. C'est une interrogation, formulée spontanément par plusieurs d'entre eux :

« Mais les pigments en peinture, comment ça marche ? ».

Les élèves manifestent une implication réelle dans la résolution du problème par ce désir de comprendre. Cette expression « *comment ça marche* » semble indiquer que leur vision habituelle, celle d'une adhérence couleur-matière, a été cassée. Le problème serait-il devenu celui de l'action des pigments sur la lumière ? Si tel est le cas, les élèves posent la bonne question au bon moment.

Le test remplit, d'une certaine façon, l'une des fonctions recherchées : celle d'une mise en appétit et d'une ouverture sur de nouvelles questions.

2. INTRODUCTION DE LA SOUSTRACTION : FONCTIONNEMENT D'UNE ARTICULATION CIBLE - OUTIL

2.1. Ombres colorées sur un écran blanc

2.1.1. Scénario

Déjà proposée dans l'enquête préliminaire (voir chapitre 1), la situation des ombres colorées s'y était révélée très stimulante. Reprise dans la séquence (encadré 3), elle a joué de nouveau un rôle de déclencheur d'analyse par le jeu de prévision / observation. Les étudiants se mobilisent volontiers pour produire une explication devant un montage installé dont ils connaissent l'ensemble des éléments.

Dans certains groupes, une réflexion individuelle avant observation conduit à une prévision rédigée. Ce sont 50 réponses de type « prévision » que nous analysons.

Dans d'autres groupes, la prévision a fait l'objet d'une discussion par petits groupes. Puis l'expérience a été réalisée, analysée et interprétée en commençant par le cas de trois sources¹. Dans ce cas, l'enseignant insiste sur une double interprétation : addition de deux des lumières colorées ou soustraction de la troisième lumière par rapport à la lumière blanche.

Les étudiants rédigent individuellement un compte-rendu après observation et discussion : ce sont des réponses de type « rédaction » (N = 33).

2.1.2. La cible

Cette séance sur les ombres colorées a pour objectif principal l'introduction de la soustraction d'une lumière colorée fondamentale (rouge, verte ou bleue) par rapport à la lumière blanche, et l'analyse des couleurs qui en résultent. Il s'agit là d'un premier pas dans la construction de la notion de synthèse soustractive.

Devant l'expérience avec deux sources, comment l'absence de l'une des lumières est-elle envisagée et combinée à la présence de l'autre ?

Devant celle avec trois sources, l'absence de l'une des lumières par rapport au fond blanc amène-t-elle spontanément les étudiants à une interprétation en termes de soustraction ?

2.1.3. Les outils

Rappelons que les outils en principe disponibles à cette étape sont :

- la propagation rectiligne de la lumière ;
- la diffusion de lumière colorée par l'écran blanc ;
- les lois de l'addition de lumières colorées (synthèse additive) ;
- l'idée que l'ombre est une plage où la lumière n'arrive pas, arrêtée par l'obstacle.

L'expérience est réalisée, analysée et interprétée, en commençant par le cas de trois sources où le phénomène de contraste simultané n'est pas le phénomène dominant.

2.2. Analyse des réponses

Le tableau de la page 98 comporte une colonne « Eléments cités ». Il s'agit, soit des arguments cités à l'appui d'une prévision, soit des éléments repris parmi les explications qui ont été données après observation (« rédaction »).

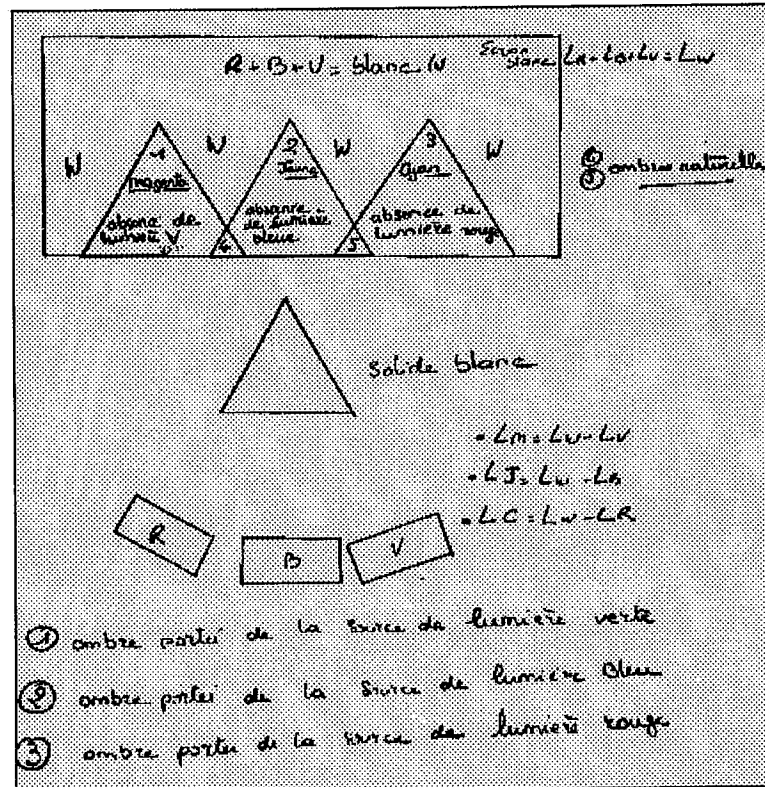
Les éléments cités ou repris indiquent trois niveaux de maîtrise dans le raisonnement demandé.

1. Dans ce cas seulement, le phénomène de contraste simultané renforce les couleurs prévues par analyse de la composition de la lumière et ne perturbe pas l'interprétation.

Niveau 1.

Pour aboutir à la réponse correcte, l'ensemble des éléments est maîtrisé : la propagation de la lumière, la diffusion par l'écran et les lois d'addition des lumières colorées.

Encadré 3 : Rédaction (niveau 1)



Niveau 2.

Deux difficultés apparaissent dans les réponses.

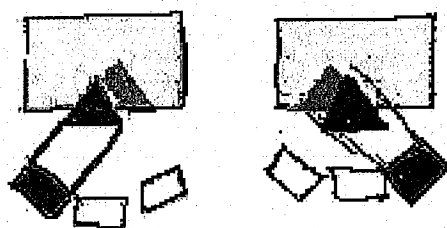
* « L'ombre est sombre »

La première difficulté est de prendre en compte les autres lumières dans une zone d'ombre pour l'une des lumières : il s'agit d'une situation non prototypique où interviennent à la fois, pour différentes plages, l'absence d'une des lumières et la présence, et donc l'addition, de deux autres. La mémorisation des lois d'addition, correctement utilisées pour la couleur du fond, ne suffit pas. Il faut d'abord concevoir le trajet des différentes lumières entre les éléments du montage. Un tel raisonnement est bloqué par l'observation courante : en l'absence de lumière, l'ombre est une plage sombre. On trouvera dans l'encadré 4 une réponse de ce type, l'étudiante y prévoit correctement la couleur du fond avec deux lumières, mais ne connaît pas le résultat avec les trois (absence au cours précédent ?)

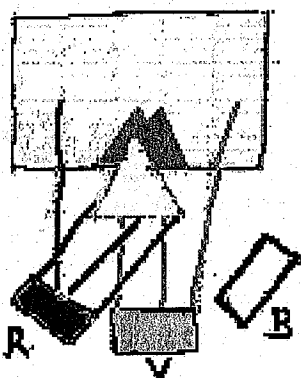
Encadré 4 : Prévision (niveau 2)



La face 1 est verte intense, l'écran
également et on verra un nuage gris
au dos de la face 1 qui fait obstacle
pareil pour le bleu \rightarrow nuage gris.
pour le R \rightarrow " gris.

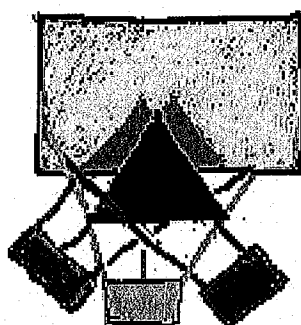


2.



$LR + LV = \text{jaune}$

3



L'addition de R, V, B
donne sur la face de
l'obstacle du Noir
ses ombres sont confuses
(~~XX~~) L'écran est Noir
mais mais interne.

* « Une ombre est toujours colorée »

Une autre difficulté surgit pour certains groupes d'étudiants qui ont travaillé sur ce point de la couleur en arts plastiques. L'intitulé « ombres colorées » évoque pour eux une situation connue, mais différente de celle-ci : celle où l'ombre est colorée d'une couleur complémentaire de celle de l'objet par contraste simultané. Ils en ont retenu que les ombres sont « **colorées par nature** », et non pas **qu'elles paraissent** colorées à cause du contraste simultané. Dans le cas présent, ils n'utilisent pas non plus le raisonnement direct en termes d'arrivée de lumière dans la zone d'ombre et échouent dans la prévision avec trois sources. Pour répondre à la question, ils s'aident d'un schéma appris² pour mémoriser les couleurs complémentaires.

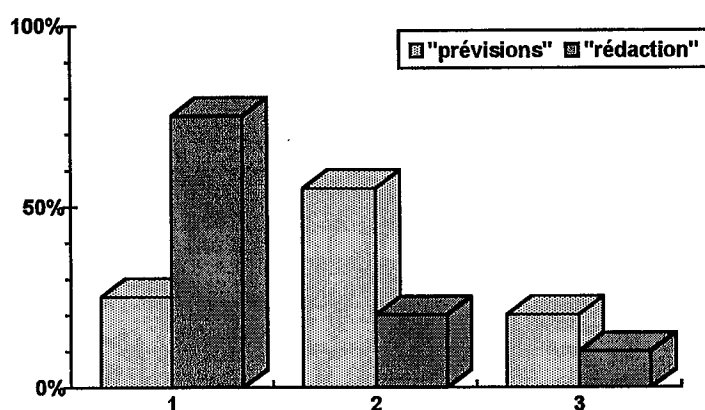
Niveau 3.

Dans le troisième groupe, la propagation des lumières colorées est mal maîtrisée, l'addition de lumières sur le fond n'est pas envisagée.

Tableau récapitulatif : Ombres colorées

Réponses « prévision »	Eléments cités ou repris dans les commentaires	Réponses « rédaction »
Niveau 1. 25%	localisation des plages addition de lumières sur le fond absence d'une des lumières et présence de l'autre (cas de deux sources) addition correcte de deux lumières (cas de trois sources)	75% dont 20 % (soustraction)
Niveau 2. 55% dont 30 % (contraste simultané)	localisation des plages addition de lumières sur le fond absence d'une des lumières, mais l'autre (les autres) n'est (ne sont) pas présente(s)	20% dont 10 % (contraste simultané)
Niveau 3. 20%	localisation des plages pas d'addition de lumières sur le fond ombres sombres	5%

². Cercle chromatique comportant une gamme de 6 couleurs régulièrement réparties où les couleurs complémentaires sont situées sur le même diamètre. Le mélange de deux couleurs complémentaires donne du noir en synthèse soustractive, alors qu'en synthèse additive, le mélange des mêmes couleurs donne du blanc. Invoquer le même schéma conduit donc à des confusions.



Les points suivants se dégagent.

Les étudiants réussissent en ce qui concerne l'addition de lumières sur le fond (niveaux 1 et 2), puisqu'une forte majorité d'entre eux a correctement prévu la couleur du fond, aussi bien en « prévision » qu'en « rédaction » (80% et 95%). La mémorisation des lois d'addition de lumières reste stable.

Mais des obstacles à un raisonnement par arrivée de lumière dans la zone d'ombre se manifestent, comme en témoignent les taux d'échecs dans la prévision relative aux zones d'ombres (niveaux 2 et 3, « prévisions »).

L'idée de soustraction de lumière n'apparaît pas spontanément, elle n'est reprise que dans 20% des réponses « rédaction ». Il s'agit là d'une connaissance à construire.

2.3. Points marquants

Les lois d'addition de lumières sont mémorisées de façon stable par la grande majorité des étudiants. Ceux-ci ont acquis l'aptitude à gérer la propagation de la lumière blanche ou colorée. Pour certains, une connaissance des ombres colorées par contraste simultané est un obstacle à un raisonnement en termes de lumière.

En revanche, la notion de soustraction est peu reprise, même après expérience et interprétation. Pour la grande majorité des étudiants, cette situation proposée pour introduire l'idée de soustraction de lumière colorée par rapport à la lumière blanche ne fonctionne pas d'emblée. Il est difficile de savoir si cette faible mobilisation de l'idée de soustraction est due à une difficulté intrinsèque ou au fait que dans cette situation un autre raisonnement en termes d'addition suffit.

Il semble que la manipulation d'une combinatoire à la fois additive et soustractive des lumières fondamentales par rapport à la lumière blanche nécessite un temps de maturation plus long.

3. ABSORPTION DE LUMIERE ET DIFFUSION : PERSISTANCE DE DIFFICULTES ET REORIENTATION DE QUESTIONS

3.1. L'idée de soustraction dans la séquence

L'analyse spectrale de lumières blanche et colorées (séance 3 de la séquence) ne fait pas apparaître de difficulté particulière. Dans le cas d'un matériau transparent, l'idée de soustraction de lumière est bien acceptée. Dans la mesure où la lumière traverse la matière, les étudiants admettent qu'il puisse y avoir une interaction entre la lumière incidente et la matière qui se traduise par une extinction totale ou partielle de certaines bandes de radiations. De plus cette extinction est facile à mettre en évidence dans la lumière transmise.

Les résultats (bien connus par nos étudiants) que donnent les divers mélanges de peintures primaires sont repris ensuite pour être analysés dans les mêmes termes de chaîne de transformations de la lumière. C'est donc un travail d'explicitation de l'action d'un pigment ou d'un mélange de pigments sur la lumière qui a été mené. L'objectif est de convaincre les étudiants que le raisonnement conduit pour les corps transparents est valable pour les corps opaques. Mais accepter cette analogie entre pigments et filtres en ce qui concerne le phénomène d'absorption sélective de lumière est plus difficile et se heurte à la difficulté d'envisager la lumière diffusée.

La situation expérimentale décrite ci-après est proposée deux semaines après l'étude des pigments. Elle correspond à une étape de consolidation dans la compréhension de la couleur des corps opaques. A ce stade, l'association tenace entre couleur et matière colorée a-t-elle évolué ? Comment les étudiants analysent-ils l'action d'un écran coloré sur une lumière incidente de composition connue ? L'absorption a-t-elle été comprise comme soustraction d'une lumière colorée ?

3.2. La situation expérimentale : ombre en lumière colorée sur un écran coloré

3.2.1. Scénario

Le phénomène d'absorption sélective de lumière colorée par l'écran coloré est mis en évidence par la variation de l'aspect de l'écran, selon la lumière incidente utilisée. Il est nécessaire d'avoir un élément de comparaison, c'est le rôle de la plage d'ombre.

La question proposée ne comporte qu'un fait nouveau par rapport à celui décrit précédemment : l'introduction d'un écran coloré pour y produire une ombre portée.

3.2.2. Les questions (première version)

Ombre sur un écran coloré

On éclaire avec une lumière colorée l'objet blanc T placé devant un écran coloré. On compare la couleur de la face éclairée de l'objet blanc (T), la couleur de l'écran et la couleur de l'ombre de T sur l'écran.

Prévisions

a - **l'écran est noir**, la lumière est rouge.

Verra-t-on l'ombre sur l'écran ? oui non

Expliquez.

b - **l'écran est rouge**, on éclaire avec une lumière verte, rouge et bleue successivement. De quelle couleur paraîtront l'écran et l'ombre par rapport à la face de T ?

- en lumière verte ?
- en lumière rouge ?
- en lumière bleue ?

Justifiez votre réponse.

3.2.3. Un raisonnement en « tout ou rien » attendu pour la prévision

Nous analysons les réponses recueillies pour cette première version qui porte sur une prévision relative à la **comparaison des couleurs** observées sur les deux plages de l'écran : celle de la zone d'ombre portée par l'objet opaque éclairé, et celle du reste de l'écran (papier coloré) qui reçoit la même lumière que l'objet.

En effet, les lumières colorées choisies sont rouge, verte ou bleue, correspondant au tiers du spectre de la lumière blanche. Les papiers colorés sont choisis de couleurs le plus saturées possible et également rouge, vert et bleu.

La prévision peut faire intervenir un raisonnement en **tout ou rien**.

Un papier rouge ne diffuse que la lumière rouge ; lorsqu'il est éclairé en lumière rouge, la composition de la lumière reçue par l'observateur est la même que celle qui est reçue par l'écran.

Le papier rouge absorbe, donc « éteint » les lumières verte et bleue. Eclairé en lumière verte ou bleue, il ne renvoie **rien** (ou presque) vers l'observateur qui voit l'écran **noir** (sombre ou foncé).

Pour une réponse correcte, le raisonnement s'appuie sur

- une analyse de la composition de la lumière reçue ;
- une analyse de la composition de la lumière diffusée par l'écran vers l'observateur ;
- une comparaison des intensités relatives des lumières venant de la zone d'ombre et du reste de l'écran.

3.3. Les réponses

3.3.1. Ecran noir (en lumière blanche) éclairé en lumière rouge

Ecran noir / lumière rouge verra-t-on l'ombre sur l'écran ?	non *	oui
Prévisions (N = 52)	85 %	15 %

* Réponse correcte

Donner une justification complète de la réponse correcte dans ce cas demande de prendre en compte les faits suivants :

- l'écran noir absorbe toute (ou presque toute) la lumière reçue et ne renvoie rien vers l'observateur ;
- l'obstacle T arrête la lumière, la plage d'ombre ne reçoit aucune lumière ;
- l'écran noir et la plage d'ombre paraissent identiques à l'observateur.

Pour cette question, les réponses sont correctes en grande majorité, avec un commentaire du type :

« on ne voit pas d'ombre, car l'écran absorbe la lumière ».

Elles sont explicites, le plus souvent, sur l'absorption de toute lumière par la surface noire et sur l'identité qui en résulte pour l'observateur entre l'ombre et le reste de l'écran. Quelques commentaires soulignent l'absence de lumière diffusée :

« on ne voit pas l'ombre car l'écran ne renvoie aucune lumière, il absorbe complètement le flux lumineux de la lumière rouge ».

3.3.2. Ecran rouge éclairé en lumière rouge

De quelle couleur paraît en lumière rouge...	l'écran ?	l'ombre ?
Prévisions (N = 52)	rouge* : 70 % sans réponse : 30 %	Sombre* : 40 % rouge foncé : 30 % sans réponse : 30 %

* réponse correcte

Lorsque l'écran est rouge, et la lumière de même couleur, la réponse à propos de l'écran est majoritairement correcte et associée, le plus fréquemment, à ce commentaire :

« un écran rouge diffuse la lumière de sa couleur ».

Cependant, dans un tiers des réponses relatives à la plage d'ombre, les étudiants affirment que cette plage conserve la **couleur du papier** malgré l'absence de lumière reçue :

« L'ombre sera un rouge plus foncé, l'écran reste rouge, et l'objet sera rouge clair ».

L'utilisation du verbe « reste » montre ici un raisonnement où la couleur est une caractéristique intrinsèque du papier.

Ceci jette un doute sur les réponses qui déclarent correctement l'écran rouge sans mentionner la diffusion. Une telle réponse peut être correcte sans que le raisonnement le soit.

3.3.3. Ecran rouge en lumière verte (ou bleue)

en lumière verte (ou bleue) l'écran paraît ...	marron (ou violet)	jaune ou magenta	noir*	Autres
N = 52	50 %	15 %	30 %	5 %

en lumière verte (ou bleue) l'ombre paraît ...	noire* sombre*	rouge (couleur du papier)
N = 52	50 %	30%

* réponse correcte

Lorsque la lumière est d'une couleur différente de celle du papier, le taux de réponses fausses augmente nettement. La réponse correcte tient compte de l'absorption de la lumière par l'écran qui est vu, comme l'ombre, noir (sombre ou foncé).

Dans les réponses de type « marron », les couleurs sont composées comme dans le cas des mélanges de pigments :

« *vert + rouge = marron* » ou « *bleu + rouge = violet* ».

Dans les réponses de type « jaune », les couleurs sont composées comme dans le cas de l'addition de lumières :

« *vert + rouge = jaune* » ou « *bleu + rouge = magenta* ».

3.4. Remarques

3.4.1. Une grande instabilité des réponses

Entre les trois questions précédentes, on voit décroître le taux de réponses correctes.

Dans le cas de l'écran noir, où l'absorption est comprise comme totale, la réponse correcte ne semble pas poser de problème. En revanche, dès qu'il faut envisager que la diffusion résulte d'un tri par l'objet dans la lumière incidente, le nombre de réponses correctes tombe au tiers de l'effectif.

Dans la situation, nouvelle pour eux, d'une ombre portée sur un écran coloré en lumière colorée, la moitié des élèves utilisent pour répondre des connaissances ritualisées, celles associées au mélange des pigments.

Le concept de couleur reste encore fortement lié à celui de pigment coloré. Les étudiants résistent lorsqu'ils doivent construire leur raisonnement sur le fait que la lumière est à l'origine de la sensation de couleur.

3.4.2. Des conditions de réalisation et de vérification difficiles

Les conditions de réalisation de l'expérience, dans une salle où la lumière ambiante subsiste, font intervenir le phénomène de contraste simultané. D'autre part, l'observation conforte les prévisions obtenues par des raisonnements faux, du type addition de pigments. En effet de la lumière rouge, diffusée par le papier « rouge » éclairé par la lumière blanche ambiante, s'ajoute à la lumière colorée, non absorbée totalement et diffusée, faisant paraître le papier « marron » en lumière verte et « magenta foncé » ou « violet » en lumière bleue.

La conjonction de ces deux types de difficultés - expérimentales et liées à la persistance de l'adhérence couleur et matière - conduit, dans le débat qui suit l'observation, à focaliser l'attention sur la luminosité plutôt que sur la couleur des plages. Orientée dans ce sens, l'argumentation s'est révélée alors convaincante pour les élèves : l'analyse en termes de lumière rend compte de l'observation, ainsi que des écarts éventuels entre une prévision en « tout ou rien » et une observation en lumière ambiante.

3.4.3. Réorientation de questions

C'est ce qui a conduit à proposer, dans une deuxième version de cet exercice (voir chapitre 2, encadré 4), une formulation portant sur **une comparaison des luminosités**.

La luminosité pour l'écran peut être « forte ou faible », tandis que la plage d'ombre reste sombre, d'où un contraste « fort ou faible » entre la zone d'ombre et le reste de l'écran.

Dans la phase d'observation, on insiste sur l'intensité de la lumière diffusée par chaque écran coloré et sur la possibilité d'éclairer par diffusion (éclairage indirect) les faces arrière du tétraèdre.

4. MAITRISE DE L'IDEE DE CHAINE : EXEMPLE DE RELATIF ABOUTISSEMENT

4.1. La situation expérimentale : influence de la lumière sur la couleur des corps

L'analyse de l'influence de la lumière sur la couleur des corps nécessite une bonne compréhension de l'ensemble des éléments conceptuels relatifs à la couleur.

4.1.1. La question

Le problème est d'abord posé sous forme d'une question de prévision que nous rappelons ici (voir aussi encadré 5 et figure 4, chap. 2).

Rappel encadré 5, chapitre 2

Couleur des objets en lumière blanche et en lumière colorée
Tableau coloré sur fond noir

On observe sur le tableau noir, éclairé en lumière blanche, des objets (lettres) de couleurs Rouge, Jaune, Vert, Cyan, Bleu, Magenta et un rond blanc O.

*** Préviation : que verra-t-on ?**

a - si on éclaire le tableau avec de la lumière ROUGE :

lettres visibles : non visibles :

b - même question pour les lumières suivantes :

lumière	lettres visibles	non visibles
VERTE		
BLEUE		
JAUNE		

c - sur un exemple de votre choix, proposez un schéma traduisant la chaîne des transformations subies par la lumière et justifiez votre réponse.

4.1.2. Toutes les connaissances disponibles

Toutes les connaissances nécessaires à la préviation sont disponibles à ce moment du déroulement de la séquence.

En effet, la couleur d'une surface dépend de la composition de la lumière diffusée par cette surface et reçue par l'observateur : elle est donc affectée par la composition de la lumière reçue et par la matière qui constitue la surface de l'objet vu.

La remarque faite, à propos de l'exercice précédent utilisant des écrans colorés, sur les conditions de vérification difficiles, doit être reprise ici. D'ailleurs les enseignants qui utilisent ce type de situations se plaignent que « *l'expérience ne marche pas* ». La lumière ambiante et la qualité des papiers aux couleurs peu saturées modifient en effet les effets attendus. C'est pourquoi nous avons posé la question en termes : « visible » ou « non visible », en mettant l'accent sur la quantité de lumière diffusée et reçue par l'observateur.

Mais surtout, questionner d'abord sur la visibilité, associée à la luminosité, permet de vérifier si les élèves raisonnent en termes de lumière. Maîtrisent-ils la composition de la lumière incidente, lumière blanche filtrée par un filtre coloré ; ont-ils compris les phénomènes d'absorption sélective ? Comment utilisent-ils cette notion à propos d'un filtre, puis à propos d'une surface colorée ? Comment

manipulent-ils la combinatoire soustractive des lumières colorées pour prévoir la couleur perçue ?

Les étudiants sont invités à expliciter leur démarche de résolution du problème et les questions qu'ils se posent. Nous analysons 44 réponses collectées dans plusieurs groupes.

4.2. Les réponses

4.2.1. Taux de prévisions et justifications correctes

Dans le tableau suivant, la première colonne fait apparaître le nombre des étudiants qui ont donné une réponse correcte aux trois questions mentionnant des lumières « tiers de spectre » (lumière rouge, ou bleue, ou verte) et ceux qui, parmi eux, ont donné des justifications correctes.

La deuxième colonne comporte les réponses correctes à la question relative à la lumière jaune (lumière « deux tiers de spectre »). Le taux de réponses correctes est la moitié du précédent, tous ceux qui les fournissent ont fait des prévisions correctes dans les situations précédentes.

Tableau

	en lumière <i>tiers de spectre</i>		en lumière <i>deux tiers de spectre</i>	
	Prévisions correctes	Justifications adéquates	Prévisions correctes	Justifications adéquates
N = 44	60 %	45 %	30 %	25 %

4.2.2. Justifications adéquates : des niveaux d'explicitation variés pour accompagner des réponses correctes

Nous avons considéré comme adéquates les justifications où étaient présentes les idées de chaîne de transformations de la lumière et de tri par l'objet coloré.

Toutes les justifications accompagnant des réponses correctes sont de ce type. Ceci nous encourage à penser que ceux qui font des prévisions correctes sans autre commentaire maîtrisent la notion de lumière absorbée par le filtre, puis par l'objet coloré (les lettres sur fond noir), analysent la composition de la lumière reçue et lui associent une sensation de couleur.

Parmi les justifications adéquates, on trouve des niveaux d'explicitation différents. Le premier, uniquement verbal, comporte une analyse allant jusqu'à la prévision de la teinte (encadré 5).

Encadré 5

« Pour savoir les lettres qu'on voit , il faut s'interroger sur les radiations qu'éteint chaque objet. En lumière rouge, on voit toutes les lettres qui n'éteignent pas la radiation rouge et l'on ne voit pas celles qui absorbent la radiation rouge.

« Justification pour le jaune : la lumière jaune est composée de radiations rouge et verte. Donc toutes les lettres qui rediffusent soit la

radiation rouge, soit la radiation verte, soit les deux seront visibles. La lettre B sera la seule lettre non visible, car elle seule éteint les deux radiations rouge et verte.

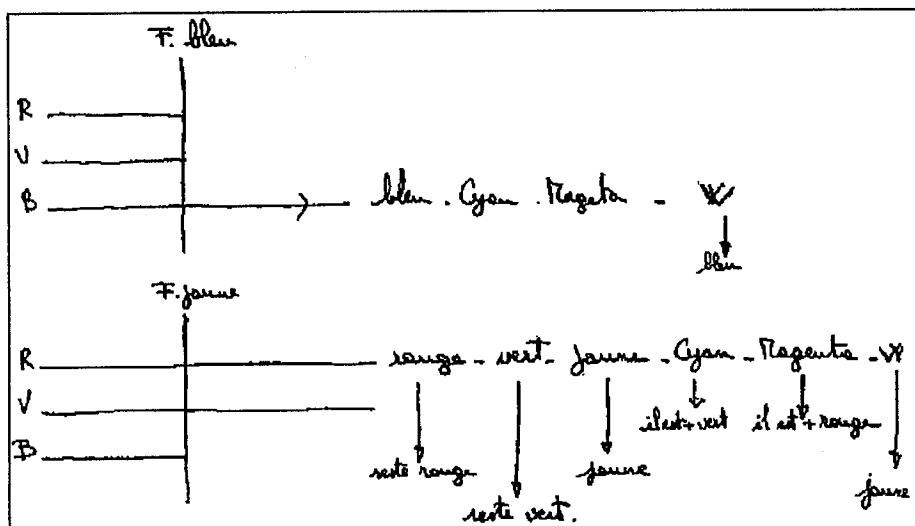
« -Toutes les lettres qui absorbent la radiation verte et rediffusent la radiation rouge donneront la sensation de rouge (ex : R, M).

« -Toutes les lettres qui absorbent la radiation rouge et rediffusent la radiation verte donneront la sensation de vision verte (V, C).

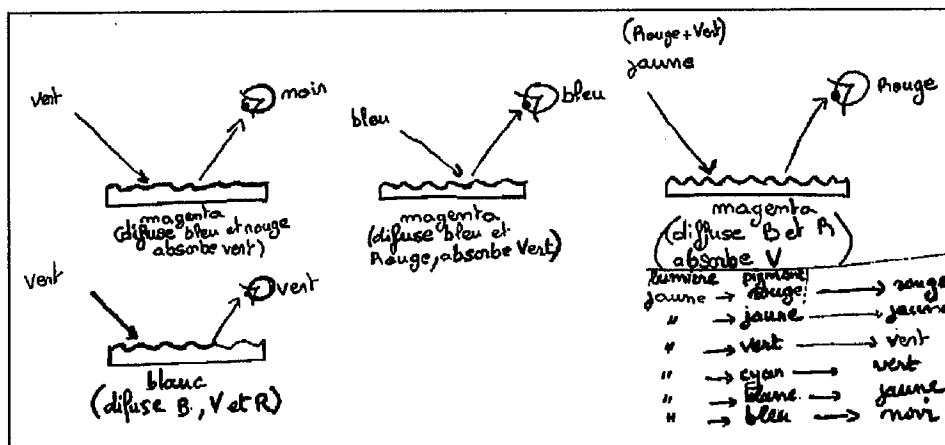
« Les lettres comme J et O qui rediffusent les radiations rouges et vertes seront vues jaunes. »

Nous donnons deux exemples de réponse utilisant des schémas de type chaîne (encadrés 6 et 7). Dans l'encadré 6, la composition de la lumière incidente est clairement indiquée ; dans l'encadré 7, l'action des pigments sur la lumière est traitée complètement (absorption et diffusion), ce qui permet aussi une prévision de la couleur des corps.

Encadré 6



Encadré 7



Dans certaines justifications, on observe des difficultés de formulation en ce qui concerne la composition spectrale de la lumière. Les étudiants utilisent fréquemment une expression ambiguë du type « *une couleur est composée de...* » : s'agit-il du mélange de pigments ou de la composition de la lumière ? Mais de telles formulations peuvent correspondre, comme dans l'exemple suivant, à un raisonnement utilisant correctement la lumière :

« les lettres sont visibles si elles sont éclairées par une lumière qui n'est pas absorbée par la couleur des lettres. Il faut tenir compte de la composition des couleurs des lettres. »

Dans cet autre extrait, où le raisonnement conduit encore à une réponse juste, le mot *lumière* n'est pas prononcé, mais l'absorption est mentionnée et associée à la compréhension de l'idée de tri :

« les lettres non visibles sont celles qui absorbent le rouge, car elles ne sont pas composées de rouge ; ex : le cyan est composé de bleu + de vert, il ne renvoie donc que ces deux couleurs, il absorbe le rouge. »

4.2.3. Plusieurs difficultés

On note, dans certaines réponses une confusion entre l'objet-filtre et la lumière colorée, résultat du passage de la lumière blanche à travers cet objet :

« la lumière rouge va absorber le vert et le bleu, la lumière rouge renvoie le rouge. Certaines lettres absorbent le rouge, mais seront visibles d'une autre couleur. »

On peut faire l'hypothèse qu'il ne s'agit pas seulement d'un problème de vocabulaire, mais plutôt de la persistance de la confusion entre lumière et matière.

Dans d'autres réponses, la composition de la lumière incidente est souvent explicitée : l'action de soustraction du filtre est comprise, mais l'action de la lettre sur la lumière n'est pas correctement analysée. En d'autres termes, l'analogie pigment-filtre n'est pas disponible, l'idée de soustraction de lumière par la lettre n'apparaît pas.

Ainsi on observe que des élèves utilisent les règles d'addition des lumières colorées : par exemple, de la lumière rouge éclairant la lettre V (verte en lumière blanche) donne du « jaune ».

Dans l'exemple donné dans l'encadré 8, l'étudiant s'est construit un certain nombre de règles opérationnelles qui ne recouvrent pas la totalité des cas étudiés. Il utilise la notion de couleur complémentaire par rapport à la couleur de la lumière incidente pour déterminer quels seront les objets non visibles ; l'idée d'absorption par l'objet est totalement absente de son raisonnement. Ses erreurs illustrent l'insuffisance de règles mémorisées. De plus, ses commentaires prennent la forme d'une description de la situation où l'observateur n'est pas présent.

Encadré 8

Lumières	Lettre sur le tableau
ROUGE	<u>R</u> V B C F S O
VERTE	R <u>V</u> B C F S O
BLEUE	R V B C F <u>J</u> O
JAUNE	R V B C F J <u>O</u>

— Lettres dont la couleur reste inchangée.
 □ Lettres devenues non visible.
 ○ Lettres dont la couleur est modifiée

4.3. Caractère convaincant de l'expérience après prévisions

Centrer sur la **luminosité** semble avoir rendu le résultat de l'expérience très convaincant, sans restriction, pour la totalité des élèves.

Le problème des **teintes** des différentes lettres a pu ainsi être discuté et maîtrisé par les élèves, dans un deuxième temps, cela malgré les mauvaises conditions d'observation dues à la lumière ambiante. Lorsque la question de la teinte est soulevée d'emblée, comme dans les versions classiques de telles questions, le résultat de l'expérience provoque contestation et difficultés inextricables, comme nous avons pu le constater nous-mêmes. Le choix fait ici se traduit au contraire par le fait que les étudiants sont convaincus de la validité et de l'efficacité du raisonnement proposé.

Ce choix, qui se révèle positif, n'est pas pour autant naturel. Il conduit à exercer une contrainte sur les élèves qui, spontanément, se posent plus volontiers des questions sur la teinte de la couleur, comme en témoignent ces réponses :

- « Chercher d'abord quelles couleurs contiennent du rouge. Les lettres apparaîtront mais pas de la même couleur qu'elles désignent. »
- « Les lettres qui sont visibles ont évidemment changé de teinte. »

4.4. Commentaires

La maîtrise de cette question témoigne d'une intégration relativement complète de tous les éléments de la séquence. Un tiers environ des étudiants y parviennent.

L'insuffisance de résultats mémorisés ou de règles parcellaires apparaît clairement et montre, par contraste, la nécessité d'une compréhension intégrée de tous les éléments de la séquence, notamment le raisonnement sur la lumière et la prise en compte de l'absorption par la matière.

Le choix de faire porter prédictions et observations sur la luminosité centre, d'une part, l'attention de l'étudiant sur les points cruciaux de l'absorption et de la diffusion sélective de lumière ; il permet, d'autre part, à l'observation de se révéler plus convaincante que si on l'aborde par la teinte. C'est un exemple typique où l'observation d'une expérience semble devoir être guidée pour se révéler convaincante.

5. CONCLUSION

Cette observation fine d'épisodes cruciaux de notre séquence appelle quelques conclusions.

Certaines s'expriment en termes de validation d'hypothèses, notamment :

- le rôle décisif de l'expérience d'addition de lumière rouge et verte, lors de laquelle,
 - l'effet de surprise est associé à une excellente mémorisation du résultat (du jaune),
 - la distance considérable entre le résultat observé et celui que dicteraient les règles de mélanges de pigments, « casse » ce type de raisonnement et favorise l'introduction de la couleur comme réponse perceptive du système visuel à la lumière ;
- le rôle de déclencheur que joue la situation d'ombres colorées dans la remise en cause de l'idée que « l'ombre est sombre » et dans l'orientation du raisonnement vers une analyse en termes de lumière.

Cependant, toutes nos attentes n'ont pas été vérifiées. Ainsi la situation d'ombres colorées n'a pas suffi à introduire de manière marquante la nécessité d'une combinatoire à la fois additive et soustractive des lumières colorées.

Parmi les obstacles attendus et vérifiés, se trouve essentiellement la difficulté de faire porter le raisonnement sur la lumière diffusée par les objets, sans que se superposent des vestiges de règles non

intégrées, du type : « la couleur du décor et celle de la lumière s'ajoutent ».

La localisation de tels obstacles et celle d'éléments de raisonnement fructueux permettent deux types d'avancées.

L'un consiste à affiner certains éléments de la proposition d'enseignement que constitue notre « structure didactique ». Par exemple, nous avons réorienté les questions à propos des objets colorés en lumière colorée, en mettant au second plan l'aspect teinte par rapport à l'aspect luminosité. On est là dans un cas où contingences expérimentales et cheminements conceptuels observés convergent pour suggérer un choix didactique.

L'autre consiste à retenir, pour la détermination des acquis conceptuels des étudiants, des ensembles question-élément de réponses comme indicateurs particulièrement pertinents. Par exemple, à propos des nombreuses situations d'interaction entre la lumière et la matière, ce n'est pas tant la réponse en termes de couleurs que nous retiendrons que la part faite à une justification par l'idée de lumière parvenant à l'oeil. De même l'équivalence de fonctionnement, du point de vue de la soustraction sélective, des pigments et des filtres occupera dans nos évaluations une place importante. Ceci est justifié par la difficulté patente à penser ce phénomène de soustraction de lumière (en dépit des refrains sur les synthèses soustractives). Ou encore on prendra soin de vérifier que si deux plages sont prévues de la même couleur, c'est bien en analysant la lumière diffusée que l'étudiant se prononce.

Ceci nous amène à la dernière partie de ce travail : l'évaluation globale. Celle-ci met en jeu les points sur lesquels ce chapitre vient de centrer l'attention ; elle ne s'y limite pas.

CHAPITRE 4

EVALUATION FINALE

1. INTRODUCTION

1.1. Un outil d'évaluation pour caractériser un éventail de compétences

Quel est l'impact de la séquence dans son ensemble et dans quelle mesure a-t-elle permis un accroissement de la disponibilité des outils conceptuels enseignés ? Peut-on en juger autrement qu'en termes d'un « mieux » global ? Telles sont les questions auxquelles nous sommes confrontés à la fin de cette mise en oeuvre de deux années consécutives.

L'idée est de mesurer l'impact de la séquence sur un **éventail** de compétences. On ne saurait en effet se limiter à un seul type de questions, pour deux raisons. L'une est de se prémunir contre le biais habituel des évaluations de séquences menées à l'aide de questions par trop ciblées, l'autre est que précisément, ici, c'est l'intégration qui est visée. On s'intéresse autant au raisonnement, à l'opérativité et à la disponibilité des notions dans différents domaines qu'aux connaissances mémorisées.

A cette fin, nous avons souhaité construire un questionnaire dont les questions soient de types variés. Nous caractérisons d'abord ces questions en fonction de critères a priori cohérents avec notre projet d'intégration. Le fait que certaines de ces questions aient été elles-mêmes expérimentées en questionnaire préliminaire ou en cours de séquence a d'ailleurs facilité ce travail d'analyse.

Dans l'évaluation de la séquence, nous nous limitons à l'analyse de tendances d'ensemble des groupes, et donc nous nous appuyons principalement sur les taux des réponses et des commentaires. Sachant qu'un individu donné peut osciller d'un registre de raisonnement à un autre, il nous a en effet paru préférable dans un premier temps de nous centrer sur des résultats qui « lissent » la variabilité individuelle.

Cette évaluation elle-même comporte deux parties, l'une interne, l'autre externe. Elle devrait nous permettre de mettre en évidence d'éventuelles évolutions associées à la séquence et de repérer les obstacles persistants.

Sur ces deux aspects, elle est éclairée par, et mise en rapport avec, les informations recueillies en cours de séquence (carnet de notes), comprenant notamment des productions individuelles.

1.2. Caractérisation des questions

1.2.1. Critères d'analyse des questions

Notre liste de questions (voir annexe I) comprend des items déjà utilisés dans le questionnaire initial ou en cours de séquence, et d'autres ajoutés pour compléter l'éventail.

Nos objectifs de départ :

- favoriser la disponibilité d'outils conceptuels pour l'élaboration de raisonnements, par opposition aux réponses toutes faites (mémorisées),
- pour ce faire, introduire l'idée de chaîne de transport de l'information sur la couleur, qui met en cause et intègre des éléments conceptuels en provenance de divers domaines classiques d'enseignement,

nous ont permis d'établir les quatre critères qui ont déterminé nos choix.

Ces critères sont :

- le domaine principal de rattachement scolaire ;
- la nécessité, pour atteindre la bonne réponse, de maîtriser l'idée de chaîne ;
- le statut de la question vis à vis des enseignements classiques : question plus ou moins habituelle ;
- la possibilité (évaluée par nous) de répondre correctement par simple mémorisation.

1. Domaine principal de rattachement scolaire

Certaines questions portent sur des connaissances qui ne remettent pas en cause le **découpage classique** entre les différents domaines. Des **connaissances locales** permettent de donner des éléments de réponses correctes : connaissances simplement liées au contenu d'un cours de **physique** (question sur le laser), connaissances liées aux moyens **techniques** de création de couleurs (question sur la synthèse additive ou soustractive) ou questions sur une situation prototypique où interviennent le fonctionnement du système visuel et la **perception** (question sur le contraste simultané). Elles ne sont pas, a priori, discriminantes pour évaluer la disponibilité des outils conceptuels introduits dans la séquence.

La ligne 1 du tableau 4.1. mentionne le domaine principal de rattachement scolaire de chacune des questions.

2. Des questions qui requièrent plus ou moins une analyse en termes de chaîne

Certaines questions sont plus que d'autres directement **liées à la problématique de la séquence**. Une bonne réponse complètement justifiée fait alors appel à des connaissances en provenance de plusieurs domaines et nécessite une intégration relative des éléments de la chaîne conceptuelle introduite dans la séquence.

Nous indiquons dans la ligne 2 du tableau 4.1. les domaines de rattachement des éléments conceptuels de la chaîne d'analyse jugés a priori nécessaires pour la bonne réponse.

3. Des questions classiques ou des questions inhabituelles

Par ailleurs, certaines de ces questions sont tout à fait « **classiques** », c'est-à-dire qu'elles portent sur un point explicitement énoncé dans le programme. L'intitulé de la question est alors proche de celui d'une question classiquement posée à l'examen (deuxième groupe d'épreuves du B.T.S.). Il s'agit, par exemple de donner une définition, comme c'est le cas pour les synthèses additives et soustractives, ou de prévoir la couleur d'un corps.

D'autres se caractérisent par une formulation **inhabituelle**, notamment celles qui impliquent une compréhension de la couleur comme perception. C'est le cas pour des questions telles que « voit-on toutes les couleurs... » ou « un spectateur peut-il faire la différence si... » ou encore « observe-t-on les mêmes couleurs si... ». La question elle-même incite à une prise en compte de l'observateur, ce qui n'est pas le cas pour des formulations plus classiques.

Nous classons selon ce critère les différentes questions dans la ligne 3 du tableau 4.1.

4. Des réponses correctes mémorisables ou non

Enfin, nous évaluons la vraisemblance d'une réponse correcte mémorisée, indiquée dans la ligne 4 du tableau 4.1.. Ceci se fait en tenant compte très précisément de la formulation de la question (ligne 3 du tableau 4.1.), de la « longueur de la chaîne » à appréhender (c'est-à-dire du nombre d'éléments conceptuels à intégrer dans le raisonnement), et d'une évaluation de la complexité du raisonnement en termes « d'addition » et de « soustraction » de lumières à mettre en oeuvre. Un grand nombre de combinaisons possibles interdit la mémorisation.

5. Récapitulation : quelles questions sont a priori discriminantes du point de vue de la chaîne ?

Nous considérons comme telles les questions pour lesquelles une réponse correcte ne peut être mémorisée (cf. ligne 4), ni justifiée sans mettre en jeu des éléments de chaîne relevant des trois domaines physique, technique et perceptif (ligne 2). Quant aux deux autres critères de classification (dominante de rattachement scolaire et caractère classique de la question), nous y ferons référence plus tard dans la discussion.

Tableau 4.1. : Les questions et leurs caractéristiques

Questions	1. arc-en-ciel	2.1 synthèse additive	2.2. système visuel	3. laser	4. diffusion et couleur	5. filtre = pigment	6. couleurs des corps	7. synthèses	8. contraste
dominante de rattachement scolaire	Φ	T	Ψ	Φ	Φ	T	T	T	Ψ
ce à quoi fait appel la bonne réponse	Φ T Ψ	T Ψ	Ψ	Φ	Φ Ψ	Φ T Ψ	Φ T Ψ	Φ T Ψ	Φ Ψ
Classique	non	oui	non	non	non	non	oui	oui	non
Possibilité de répondre par coeur	non	oui	oui	non	non	non	non	oui	non

Légende :

- T : domaine technique, techniques de production de couleurs par addition de lumières ou mélanges de matières
- Φ : domaine de la physique, référence à la lumière
- Ψ : domaine de la perception

1.2.2. Un éventail de questions : présentation

1. Arc-en-ciel

Q1. Voit-on toutes les couleurs dans l'arc-en-ciel ? oui non je ne sais pas
Justifiez votre réponse

Cette question se rattache essentiellement au domaine de la physique, puisque l'arc-en-ciel est un phénomène analogue à celui de la décomposition de la lumière blanche par un prisme, conduisant à l'observation du spectre de la lumière blanche.

Le critère essentiel d'analyse des réponses est la présence d'une référence à la **lumière**. La mention de la lumière est un élément de réponse correcte, si l'on reste dans le domaine de la physique.

Cependant, dans la perspective de la séquence, un meilleur argument en termes de chaîne est que certaines couleurs peuvent être obtenues par addition de lumières (monochromatiques ou non, par exemple le magenta obtenu par addition de lumière rouge et de lumière bleue n'est pas une couleur spectrale).

2. Synthèse additive (lumières rouge et verte) et rôle du système visuel

Q2.1. Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte. Qu'observe-t-on, là où les faisceaux se superposent ?

- | | |
|--|---|
| du blanc..... <input type="checkbox"/> | du rouge et du vert..... <input type="checkbox"/> |
| du marron ... <input type="checkbox"/> | je ne sais pas..... <input type="checkbox"/> |
| du jaune..... <input type="checkbox"/> | autre..... <input type="checkbox"/> |

Q2.2. Où se crée cette couleur ?

- dans l'espace, là où les faisceaux se rencontrent ☐
 sur le décor..... ☐
 dans l'oeil de l'observateur (sur la rétine) ☐
 dans le cerveau de l'observateur ☐

Dans la première partie de la question (Q2.1.), la réponse brute est à choisir parmi plusieurs possibilités. Le domaine de connaissances est celui de la technique de production de couleurs par synthèse additive. C'est une question simple dont la réponse est facilement mémorisable.

Le choix pour la deuxième question (Q2.2.), fait par l'étudiant, donne des indications sur une conception de la couleur considérée comme réponse perceptive et sur les obstacles à une telle prise en compte. Cette question est liée à un seul domaine, celui de la perception.

3. Laser

Q3. Deux faisceaux laser, l'un rouge et l'autre vert, se croisent dans l'espace dans une zone Z. La couleur* de chaque faisceau est-elle la même avant et après avoir traversé la zone de croisement ?

* On emploie ici le terme couleur d'un faisceau pour désigner celle qu'on voit si on place un écran blanc coupant le faisceau.

oui non je ne sais pas

Cette question se rattache au domaine de la physique et aux connaissances sur la lumière. Elle est du même type que celle de l'arc-en-ciel. Sa formulation non classique ne permet pas une réponse mémorisable.

4. Diffusion et couleur

Q4. Entrant dans une salle sombre, un spectateur peut-il faire la différence entre un décor rouge éclairé par une lumière blanche et un décor blanc éclairé en lumière rouge ?

oui non je ne sais pas

Justifiez votre réponse.

Cette question ne fait intervenir qu'un maillon de la chaîne. On peut en effet considérer deux niveaux d'analyse. « *L'écran rouge ne diffuse que la lumière rouge* » est un argument suffisant pour donner la bonne réponse. L'argument « *la lumière verte et la lumière bleue sont soustraites de la lumière blanche par l'objet* » peut être ajouté comme élément de justification pour une explication plus complète.

La formulation inhabituelle de la question laisse ouvert le choix des justifications données dans la réponse.

5. Filtres et pigments

Q5. On superpose deux filtres devant l'objectif d'un projecteur de diapositives et on mélange deux pigments sur un support blanc. Le pigment 1 et le filtre 1 sont choisis de même couleur, ainsi que le filtre 2 et le pigment 2.

Observe-t-on les mêmes couleurs sur l'écran et sur la plage peinte ?

oui non ça dépend des couleurs choisies je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

Cette question concerne la comparaison des couleurs obtenues par superposition de deux filtres et mélange de deux pigments (filtre et pigment deux à deux de même couleur). Il s'agit d'utiliser l'idée de deux soustractions successives sur le trajet de la lumière transmise dans le cas des filtres et diffusée dans le cas du mélange de pigments. Les connaissances sont principalement du domaine de la technique mais une compréhension intégrée des différents domaines est requise pour une réponse correctement justifiée.

Cette question n'est pas classique, elle est particulièrement dans la ligne de la séquence.

6. Couleurs des corps sous une lumière colorée

Q6. Si on éclaire avec une source de lumière blanche un objet bicolore, il paraît magenta (cette couleur est saturée) et blanc.

1. Si on place un filtre bleu devant cette source de lumière, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

2. Si on place un filtre vert devant cette source de lumière, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

3. Si on éclaire l'objet simultanément avec deux sources, l'une de lumière verte et l'autre de lumière rouge, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

Cette question classique, car fréquemment posée sous cette forme aux examens, n'est pas triviale pour les étudiants puisqu'elle fait intervenir tous les éléments de la chaîne : composition simplifiée de la lumière incidente, rôle du filtre et rôle du pigment selon leur couleur en lumière blanche, composition de la lumière reçue par l'observateur.

La complexité de la question exclut qu'elle soit mémorisable.

7. Synthèses additive et soustractive

Q7. Il existe deux procédés de synthèse des couleurs, l'un est souvent qualifié de « mélange additif » et l'autre de « mélange soustractif ». Expliquez la différence entre les deux. Précisez les conditions d'observation en vous aidant éventuellement de schémas.

Il s'agit d'une question de même type que la précédente quant aux connaissances nécessaires. Elle est ici formulée de façon très **classique**, mais les couleurs primaires de chaque système peuvent en être **mémorisées**. Bien qu'une explication complète comporte la mention de l'addition de lumières, dans le cas du « mélange additif », et du mélange de pigments (ou de la superposition de filtres) dans le cas du « mélange soustractif », cette question technique n'est pas très discriminante du point de vue d'une analyse en termes de chaîne. De fait, la réponse est souvent apprise par coeur sous forme d'une règle et ne témoigne pas à elle seule d'une réelle compréhension des phénomènes.

Elle présente les mêmes caractéristiques que celle qui porte exclusivement sur l'addition de lumières (question 2.1.), mais en est une version plus complète.

8. Contraste simultané

Q8. Une expérience d'ombre colorée est décrite ainsi : « à la lumière du jour on plaçait un objet devant un mur blanc, on éclairait le tout avec de la lumière rouge, l'ombre portée de l'objet sur le mur apparaissait verte » (ITTEN, *Art de la couleur*).

1. Avez-vous déjà observé le même phénomène ? **oui non**
2. Cette affirmation vous paraît : **vraie fausse je ne sais pas**

Justifiez votre réponse.

Le phénomène de contraste simultané, décrit ici, trouve son origine dans le fonctionnement du système visuel. La question est donc relative à la perception comme celle sur le rôle de l'oeil et du cerveau (question 2.2.). Dans l'ouvrage cité, comme dans de nombreux ouvrages de vulgarisation d'arts plastiques, le phénomène est présenté comme « contraste de couleurs », sans que l'ensemble des conditions d'observation soit explicité.

* * *

Les deux parties suivantes de ce chapitre (2 et 3) détaillent les évaluations interne et externe question par question. Le chapitre 5 reprend ces résultats dans une présentation plus globale et plus efficace, selon nous, pour caractériser ce que nous appellerons le profil conceptuel des groupes concernés avant comme après enseignement. Il constitue une synthèse vers laquelle le lecteur pressé peut se diriger d'emblée. Celui-ci y trouvera pour chaque question inventoriée les renvois de page nécessaires pour plus de détails.

2. EVALUATION INTERNE (DETAIL)

2.1. Introduction

L'évaluation interne porte sur un groupe qui a suivi la séquence la deuxième année de son expérimentation : groupe-test TI.

On tente dans cette partie d'évaluer les acquis conceptuels d'un même groupe d'étudiants après la séquence d'enseignement à travers des réponses écrites aux questions décrites précédemment. Il s'agit d'un groupe de Plasticiens de l'Environnement Architectural (92-93). Parmi eux, 21 ont répondu au questionnaire d'entrée et 22 (sur un effectif de 25) au questionnaire final. Les réponses « après » se situent, dans le temps, après une interruption de cours d'environ un mois et demi. Lorsque les mêmes questions se retrouvent avant et après la séquence, dans les questionnaires, nous en comparons les réponses.

Dans cette évaluation, les réponses au questionnaire final sont abondamment explicitées et argumentées. Il est alors possible de dresser un bilan à la fois qualitatif et quantitatif des éléments mémorisés à relativement court terme et des éléments de raisonnement utilisés par les étudiants pour justifier leurs réponses.

Bien que les effectifs soient faibles, pour faciliter la lecture, nous donnerons les résultats quantitatifs en valeur relative, arrondie à 5 % près, ce qui correspond à un individu.

2.2. Couleurs de l'arc-en-ciel

2.2.1. La question

Q1. Voit-on toutes les couleurs dans l'arc-en-ciel ?

oui non je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

Cette question avait été posée dans le questionnaire préliminaire (voir chapitre 1) sous l'intitulé : « *toutes les couleurs sont-elles dans l'arc-en-ciel* », plus proche du langage courant. Une rédaction avec le terme « *Voit-on* » met l'accent sur le rôle de la perception.

2.2.2. Les réponses

	oui	non*	je ne sais pas
Avant N = 21	50 %	40 %	10 %
Après N = 22	15 %	85 %	0 %

* réponse correcte

Notons que le taux de réponses « non » a doublé et que tous se prononcent après enseignement.

2.2.3. Analyse des justifications

Le critère retenu pour cette analyse est la **référence explicite**, ou non, à la **lumière blanche** et à sa **décomposition**, dans le phénomène d'arc-en-ciel. Nous reprenons ainsi les mêmes catégories que dans l'enquête préliminaire (voir chapitre 1). Ces catégories que nous rappelons sont récapitulées dans le tableau 4.2. où apparaissent les fréquences relatives.

1. L'arc-en-ciel comme « *Palette de couleurs* » (pas de lumière)

Les couleurs vues dans l'arc-en-ciel sont traitées comme s'il s'agissait de **peintures**. Dans ces réponses, qui ne font **aucune référence à la lumière**, le type d'arguments le plus communément repris est :

- « oui, avec les 7 couleurs qui forment l'arc-en-ciel, on peut obtenir toutes les autres par mélange » ou bien
- « non, il n'y a pas toutes les couleurs dans l'arc-en-ciel, car il n'y en a que sept, ce sont les couleurs de base », ou encore
- « non, il y en a d'autres obtenues par mélange ».

Ces deux réponses apparaissent comme équivalentes du point de vue de l'argumentation, indépendamment du choix de « oui » ou « non ». Leur fréquence dans ce groupe (ligne 1, tableau 4.2.) est passée de 35 à 10 %.

2. L'arc-en-ciel : spectre de la lumière blanche

Nous classons dans cette catégorie les réponses qui indiquent que les couleurs de l'arc-en-ciel sont celles du spectre de la **lumière blanche**. Parmi ces réponses, on trouve deux groupes, celles qui considèrent que toutes les couleurs sont dans l'arc-en-ciel et celles qui mentionnent l'existence de couleurs invisibles comme l'ultraviolet et l'infrarouge, comme dans les exemples suivants :

- « oui puisque l'arc-en-ciel est une décomposition de la lumière et que toutes les couleurs que nous voyons sont dues à une décomposition de la lumière » (avant),
- « oui, car un arc-en-ciel est une décomposition naturelle de la lumière par les gouttes d'eau ; cette décomposition comporte toutes les couleurs existantes au monde ainsi que les U.V. et infrarouges » (avant),
- « non, l'oeil humain ne voit sur le spectre que les couleurs contenues dans le domaine visible sur le spectre des radiations..., la lumière blanche contient des radiations de lumières colorées invisibles pour l'oeil humain. » (après).

Le taux de ces réponses qui font **référence à la lumière blanche** et à sa décomposition a augmenté de 35 à 60 % (ligne 2, tableau 4.2.).

3. Décomposition de la lumière, mais existence d'autres couleurs

Une troisième catégorie comporte la mention de la décomposition de la lumière et la possibilité de produire d'autres couleurs

- d'une part, par des mélanges, dont la nature n'est pas toujours précisée :

« non, l'arc-en-ciel est la décomposition de la lumière. On peut dire qu'avec les couleurs de l'arc-en-ciel on peut obtenir toutes les couleurs, mais elles n'y sont pas à la base » (avant),

- d'autre part, par addition de lumières, dont le magenta est un exemple :

« non... certaines couleurs sont obtenues par des mélanges de radiations lumineuses organisées autrement que dans la suite colorée de l'arc-en-ciel. » (après),

« non... car le magenta ne fait pas partie des couleurs de l'arc-en-ciel. » (après).

Le taux de réponses dans cette catégorie reste stable, si on ne distingue pas ces deux arguments. Cependant 25% des réponses explicitent la possibilité de voir des couleurs par addition de lumières après la séquence, ce qui n'apparaît pas avant enseignement.

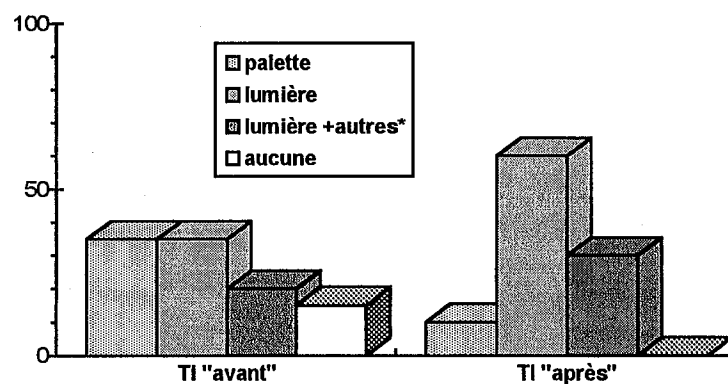
Dans le tableau ci-dessous, nous récapitulons les types de justifications invoquées et leur fréquence relative.

Tableau 4.2. « Arc-en-ciel » : types de justifications et fréquence relative.

types	exemples	avant	après
1. Palette de couleurs (ou pas de lumière)	« oui, 6 ou 7 couleurs » ou « non, il existe d'autres couleurs »	35%	10%
2. Les couleurs de l'arc-en-ciel sont celles du spectre de la lumière blanche...	« oui,... on voit toutes les couleurs du spectre » « non, ...les U.V. et IR ne sont pas visibles »	35%	60%
3. Spectre de la lumière, pas toutes les couleurs...*	...« car addition de lumières »*	0%	25%
	...« car mélange de couleurs »*	20%	5%
Pas de justification		15%	0%

*réponse correcte

Répartition des types de justifications



*réponse correcte

2.2.4. Points marquants

Dans la catégorie où les couleurs de l'arc-en-ciel sont associées à la décomposition de la lumière blanche (de 55 % « avant » à 90 % « après » la séquence (ligne 2 et 3)), les justifications données font ressortir majoritairement que la couleur est plus fortement associée à la lumière, ce qui constitue un **déplacement** par rapport à l'association commune **couleur-matière** (de 35 % à 10 %).

Toutefois on note qu'apparaît la **résistance d'une autre association, celle de couleur et de longueur d'onde**. 60 % des élèves donnent des justifications compatibles avec la confusion entre radiation et/ou longueur d'onde et couleur (ligne 2 du tableau). Rappelons que le terme « longueur d'onde » a été introduit à propos de l'analyse spectrale de la lumière blanche et colorée.

On peut penser qu'il s'agit là d'un effet de l'enseignement : une simple récitation du cours. Mais soulignons que tous se prononcent et argumentent leurs réponses. Un autre facteur pourrait contribuer à cet effet, relativement important compte tenu des précautions prises dans la séquence. Le caractère mesurable de la longueur d'onde rapproche cette grandeur d'une caractéristique d'objet. Or raisonner sur un objet et sur ses étiquettes, c'est-à-dire sur les valeurs numériques des grandeurs qui le caractérisent, est une tendance forte de la pensée (Viennot 1993). Même après la séquence, les étudiants reviennent à cette procédure simplificatrice dès que la perche leur est tendue, ce qui est le cas pour cet exemple classique de l'arc-en-ciel.

2.3. Synthèse additive et rôle du système visuel

2.3.1. Les questions

Q2.1. Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte. Qu'observe-t-on, là où les faisceaux se superposent ?

Q2.2. Où se crée cette couleur ?

dans l'espace, là où les faisceaux se rencontrent..... ☐

sur le décor..... ☐

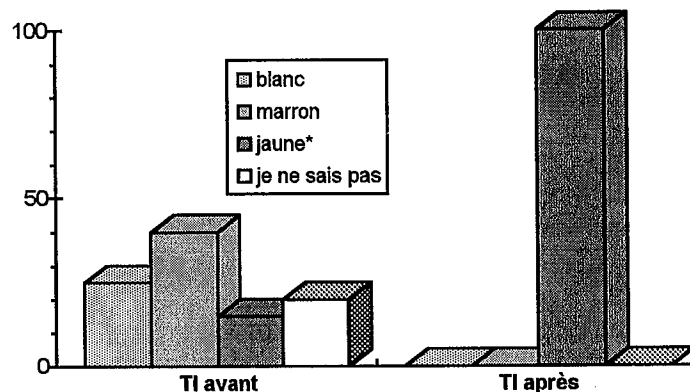
dans l'oeil de l'observateur (sur la rétine) ☐

dans le cerveau de l'observateur ☐

2.3.2. Les réponses

Q2.1.	du blanc	du marron	du jaune *	du rouge et du vert	je ne sais pas
TI avant	25 %	40 %	15 %	20 %	0 %
TI après	0 %	0 %	100 %	0 %	0 %

* réponse correcte

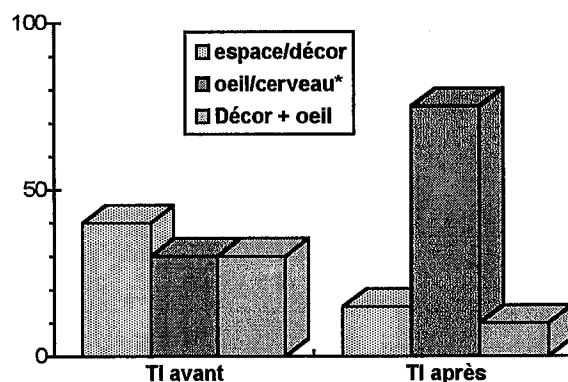


* réponse correcte

Le tableau suivant indique les résultats des choix faits par les étudiants à la deuxième partie de la question.

Q2.2.	espace/décor	oeil/cerveau* (seulement)	décor/espace + oeil
Avant	40 %	35 %	25 %
Après	20 %	70 %	10 %

* réponse correcte



* réponse correcte

2.3.3. Analyse des réponses

Ces résultats indiquent que la mémorisation des lois d'addition de lumières est excellente et que le rôle essentiel du système visuel est accepté par 70 % des élèves après la séquence. Notons que 20% des élèves n'ont pas modifié leur point de vue : « la couleur se forme là où les faisceaux se rencontrent » et que 10% font une réponse mixte, ajoutant au point de vue précédent l'acceptation du rôle de l'oeil.

Toutes les réponses « après » comportent des commentaires verbaux ou des schémas associés. Parmi eux,

- 50 % comportent l'**ensemble des éléments de la chaîne** :

« ce phénomène est celui de la synthèse additive : le cerveau humain, par l'intermédiaire de l'oeil, fait la synthèse entre les lumières de couleur qui lui sont renvoyées, soit directement, soit par réflexion sur un écran blanc » ;

- 50 % ne les reprennent que **partiellement** :

« là où les faisceaux se superposent la couleur est $V + R = \text{Jaune}$, ainsi cette couleur se crée dans le cerveau de l'observateur ».

L'addition des deux lumières sur l'écran est notée, l'oeil est présent mais le fait que les lumières pénètrent dans l'oeil n'est pas indiqué. Dans certaines de ces réponses, le fonctionnement du système visuel apparaît comme une nouvelle difficulté : *« le cerveau transmet à l'oeil qui voit jaune ».*

2.3.4. Points marquants

La prise en compte du rôle du système visuel est un élément accepté et repris par les étudiants : d'un tiers avant enseignement, la proportion passe à plus de deux tiers d'entre eux après enseignement. Elle est du même ordre que celle trouvée en cours de séquence (voir chapitre 3).

La moitié des étudiants mentionne l'ensemble des éléments de la chaîne, l'autre moitié ne l'explicite que partiellement ; la lumière diffusée entre l'écran et l'oeil est le chaînon manquant le plus fréquent.

2.4. Laser

2.4.1. La question

Lors du croisement de deux faisceaux laser, aucune interaction ne se produit. Pour les étudiants, les deux faisceaux restent-ils indépendants et la couleur est-elle associée préférentiellement à la superposition des faisceaux ou à la perception par l'observateur ?

Q3. Deux faisceaux laser, l'un rouge et l'autre vert, se croisent dans l'espace dans une zone Z. La couleur* de chaque faisceau est-elle la même avant et après avoir traversé la zone de croisement ?

oui non je ne sais pas

* On emploie ici le terme couleur d'un faisceau pour désigner celle qu'on voit si on place un écran blanc coupant le faisceau.

Cette question ne comporte pas d'équivalent avant enseignement.

2.4.2. Les réponses

	oui *	non	je ne sais pas
Après	85 %	10 %	5 %

* réponse correcte

2.4.3. Analyse des commentaires

Parmi les réponses correctes, l'indépendance et la constance des caractéristiques des faisceaux laser avant et après croisement sont des arguments repris dans 75 % des commentaires. A ce premier niveau d'affirmation (en gras dans le tableau 4.4.), s'ajoutent des compléments de type explicatif (en caractères normaux dans le tableau), que nous catégorisons de façon exclusive :

« *ce n'est pas un milieu matériel, les lumières ne sont pas changées* » (10%),

ou

« *les radiations lumineuses ne sont pas modifiées après en avoir croisé d'autres* » (15%) avec la précision « *la zone de croisement est jaune, si on place un écran* » ;

35 % notent que « *ce sera jaune dans la zone de croisement* », sans précision supplémentaire.

Au total, 50 % associent la couleur jaune à la zone de croisement.

Tableau 4.4. « Laser » : types de commentaires et leur fréquence relative

types de commentaires	TI
1. Pas de changement des radiations après*	75%
1.1. ce n'est pas un milieu matériel*	10%
1.2. « jaune » si écran*	15%
1.3. mais zone de croisement « jaune »	35%
2. superposition des faisceaux → changement de couleur après	10%
3. aucun commentaire	15%

* éléments de réponse corrects

2.4.4. Point marquant

Pour cette question, nouvelle par rapport à ce qui a été observé et discuté au cours de la séquence, 75 % répondent en postulant l'indépendance des radiations. Parmi ceux-là, 50 % mettent l'accent sur la zone de croisement, associée à la couleur jaune, ce qui confirme la mémorisation de la règle de synthèse additive. On observe très peu de réponses qui puissent s'interpréter par une adhérence couleur - peinture, l'un des faisceaux « teignant » l'autre. Les arguments ne mettent pas en jeu la perception.

2.5. Diffusion et couleur

2.5.1. La question

Q4. Entrant dans une salle sombre, un spectateur peut-il faire la différence entre un décor rouge éclairé par une lumière blanche et un décor blanc éclairé en lumière rouge ?

oui non je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

2.5.2. Les réponses

	oui	non*	je ne sais pas
Avant	55 %	35 %	10 %
Après	0 %	90 %	10 %

* réponse correcte

Cette question a aussi été posée en cours de séquence dans d'autres groupes et nous en avons analysé les réponses au chapitre 3 (voir diffusion et couleur : un saut conceptuel). Les réponses et les justifications produites « avant » ne diffèrent pas notablement de celles de ces groupes, ce à quoi l'on pouvait s'attendre. Il n'en va pas de même pour celles produites « après » la séquence.

Les réponses correctes « non » deviennent majoritaires après la séquence. Cependant, sans tenir compte des réponses « oui » ou « non », nous nous intéressons aux éléments d'analyse des phénomènes repris par les étudiants dans leurs justifications.

2.5.3. Analyse des réponses

Après enseignement, les étudiants disposent d'outils d'analyse des situations décrites. Ceux qu'implique la réponse correcte sont les suivants :

- à la notion de **diffusion** de lumière rouge par le décor blanc s'ajoute l'idée **d'absorption**, donc de tri, par le décor rouge dans la lumière blanche incidente ;
- la lumière que reçoit l'observateur a sensiblement la **même composition dans les deux cas et produit donc la même sensation de couleur**.

Ce sont ces éléments d'explication que nous recherchons dans les justifications en les classant en catégories exclusives.

1. L'observateur ne fait pas la différence, c'est la même couleur (rubrique 1 du tableau).

Dans cette catégorie, des éléments d'explication sont ajoutés :

relatifs à la composition de la lumière :

« son oeil perçoit dans les deux cas les mêmes longueurs d'onde » ;

relatif à l'absorption et à la diffusion, l'idée de tri est présente :

« en effet en lumière blanche l'écran rouge ne renverra que le rouge, le vert et le bleu seront absorbés. De même un décor blanc éclairé en lumière rouge ne renverra que du rouge » ;

« le décor rouge éclairé en lumière blanche ne renvoie que la bande de radiations rouge et absorbe le reste du spectre. le décor blanc éclairé par la lumière rouge renvoie toutes les bandes de radiations qu'il reçoit mais comme il ne reçoit que le tiers rouge du spectre le résultat est le même » ;

relatif à l'intensité de la lumière :

« les deux panneaux renvoient des ondes colorées ; l'intensité lumineuse étant la même et la proportion de rouge dans le support et dans la lumière se rapprochant, l'impression reçue sera la même » ;

ou

« tout dépend des proportions de lumière, de son intensité ».

La notion d'intensité est ici associée, à juste titre, à la quantité de lumière. Il n'en est pas de même dans la catégorie suivante.

2. L'observateur ne verra pas la même couleur, l'idée de tri n'est pas présente (rubrique 2 du tableau 4.5.) :

les couleurs n'ont pas la même intensité,

« oui car la lumière ne pourra pas être semblable dans les deux cas. le rouge couleur plus intense prend le pas sur le blanc » ;

la couleur de la lumière s'ajoute à la couleur du décor :

« un décor rouge reste rouge en lumière blanche, alors qu'un décor blanc éclairé en lumière rouge sera rouge + blanc = rose, le rouge est moins intense ».

Il s'agit dans ces réponses, non pas de l'intensité de la lumière mais de la caractéristique perceptive de la couleur, liée à la désaturation de la couleur rouge. Cette deuxième catégorie se trouve ici uniquement dans le groupe avant la séquence. Nous l'avons déjà observée au cours de la séquence (voir chapitre 3).

3. Aucune justification

Une autre catégorie d'étudiants ne donne aucune justification ou des justifications inclassables :

« en lumière rouge, le faisceau est rendu visible par la poussière »

ou

« les ombres non éclairées apparaîtront de la couleur du décor ».

Tableau 4.5. : « Diffusion et couleur »

avant	éléments d'explications	après
20%	1. même couleur	70%
5%	1.1. même composition de lumière*	15%
-	1.2. même composition, parce que absorption et diffusion*	30%
-	1.3. même composition, et intensités réglées*	15%
15%	aucune mention de lumière	10%
40%	2. ce n'est pas la même couleur	0%
5%	ce n'est pas la même intensité*	0%
35%	la couleur de la lumière s'ajoute à la couleur du décor	0%
40%	3. aucune explication ou autres	30%

* éléments de réponse corrects

2.5.4. Points marquants

La question est très ouverte et laisse aux étudiants le choix des arguments qu'ils privilégient. Pourtant, après enseignement, parmi les étudiants qui donnent la bonne réponse (70 % du total), 60 % (lignes 1.1, 1.2, 1.3) mettent l'accent sur la lumière diffusée par les décors. Ces étudiants manifestent ainsi qu'ils ont compris que seule compte la composition de la lumière qui arrive dans l'oeil de l'observateur. Parmi eux, 30 % mentionnent non seulement la diffusion de lumière rouge par le décor rouge, mais également l'idée de tri dans la lumière blanche incidente due à l'absorption sélective.

2.6. Filtres et pigments

2.6.1. Les questions

Une question, portant sur le fonctionnement analogue des filtres transparents ou des matériaux opaques par absorption sélective, comporte diverses formulations.

a) Avant enseignement, des morceaux de filtres colorés, collés sur une feuille de papier blanc, sont montrés aux étudiants. Une première question porte sur la couleur perçue lorsque deux ou trois épaisseurs sont superposées sur le trajet de la lumière. Elle est posée à propos de la même photocopie couleur que celle utilisée dans l'enquête préliminaire, et formulée dans les mêmes termes.

La deuxième question porte sur une prévision des couleurs vues si on remplace les filtres par des peintures (voir chapitre 1).

b) La formulation dans le questionnaire final est la suivante :

Q5. On superpose deux filtres devant l'objectif d'un projecteur de diapositives et on mélange deux pigments sur un support blanc. Le pigment 1 et le filtre 1 sont choisis de même couleur, ainsi que le filtre 2 et le pigment 2.

Observe-t-on les mêmes couleurs sur l'écran et sur la plage peinte ?

oui non ça dépend des couleurs choisies je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

2.6.2. Les réponses

	oui *	non	ça dépend	je ne sais pas
TI avant	30%	70%	-	0%
TI après	45%	25%	25%	5%

* réponse correcte

2.6.3. Analyse des réponses

Les réponses peuvent être classées en trois catégories principales selon le mode de raisonnement utilisé.

1. Analogie pigment / filtre : « pigments = filtres »

Avant enseignement, les étudiants utilisent les règles du mélange de peintures pour prévoir la couleur vue par superposition de filtres, sans être toujours capables de fournir une explication :

« oui, j'ai raisonné comme si j'avais à mélanger des pigments »,

ou « il s'agit d'une addition de couleurs ».

Après enseignement, lorsque l'analogie de fonctionnement entre pigments et filtres est reprise, soit **dans un tiers des réponses**, les commentaires sont corrects et comportent des éléments d'analyse de l'interaction lumière / matière. Celle-ci est alors explicitée et détaillée :

« les filtres et les pigments agissent sur les rayons lumineux, ils en absorbent une partie et renvoient l'autre dans l'oeil de l'observateur. Lorsque l'on mélange deux pigments ou que l'on superpose deux filtres, seules les radiations qui ne sont absorbées par aucun des deux filtres ou des deux pigments sont diffusées ».

2. Superposition de filtres = « superposition » ou addition de lumières

Avant la séquence, les étudiants utilisent les lois d'addition des lumières pour répondre ou déclarent qu'il faut les appliquer, mais qu'ils les ont oubliées. Pour ceux-là, par exemple, les plages correspondant à la superposition de trois filtres sont prévues « blanc », alors que la réponse correcte est « noir » ou « foncé ». Certains commentaires explicitent cette différence :

« non, car il n'est plus question ici d'additionner des couleurs lumières, en mélangeant des pigments on obtient du marron (R + V) ».

Après la séquence, les réponses « non » et « ça dépend des couleurs choisies » se trouvent données et justifiées par 50% des étudiants, sur la base d'une confusion analogue : ceux-ci comprennent superposition de **filtres** sur le trajet de la lumière comme superposition de « **lumières** » et utilisent alors les règles de l'addition des lumières pour prévoir à tort un résultat différent pour les couleurs perçues :

« car une lumière colorée n'a aucun rapport avec une couleur pigmentaire. Par exemple, l'addition d'un filtre rouge et d'un filtre vert donnera un jaune tandis qu'un mélange de pigments rouge et vert donnera un marron ».

3. Mélange de pigments : synthèse « additive » \Rightarrow pigments additifs

Nous qualifions de « **pigments additifs** » les réponses où les filtres superposés donnent des couleurs par synthèse soustractive (ce qui est correct), mais où les pigments, parce qu'on les ajoute (addition), donnent, pour les étudiants, des couleurs par synthèse additive.

« non, les mélanges de pigments donnent une gamme colorée additive, la gamme colorée par filtres est une gamme colorée soustractive par arrêt de la couleur par les filtres ».

Nous citons dans le tableau suivant les éléments les plus significatifs des justifications pour les différents types de réponses et leur fréquence relative. Les mêmes types de réponses (en gras) se retrouvent avant et après, mais les justifications après la séquence comportent des éléments d'analyse que nous indiquons dans les lignes suivantes.

Tableau 4.6. : « Filtres et pigments »

Avant	Modes de raisonnement	Après
20%	1. oui, pigments = filtres*	35%
-	interaction lumière/matière	10%
-	absorption sélective	25%
60%	2. superposition de filtres = addition de lumières	50%
-	« non »	25%
-	« ça dépend des couleurs choisies »	25%
5%	3. non, « pigments additifs »	0%
15%	aucune justification	15%

2.6.4. Points marquants

Ce groupe montre qu'il a reçu un apprentissage relatif à la couleur, les années précédentes. Certains ont retenu une distinction entre « couleur-lumière » et « couleur-matière ». Mais ces éléments disparates se révèlent non ou peu utilisables pour une analyse de la situation décrite dans la question.

Une même erreur se retrouve dans des proportions analogues avant et après la séquence. Il s'agit de la confusion sur ce qui se passe dans une superposition (en ce sens « superposer » des filtres donne le même effet que « superposer » les lumières colorées qui en résultent). Cette confusion, qui amène des réponses fausses, n'exclut pas la mémorisation correcte des lois de l'addition de lumières.

Dans les arguments utilisés dans les réponses « après », il apparaît clairement que cette question permet de distinguer deux groupes : ceux qui ont mémorisé simplement des règles et ceux qui ont compris ce qu'est l'absorption sélective par la matière, soit un tiers environ.

2.7. Couleur des corps en lumière blanche et colorée

2.7.1. Les questions

Ces questions reprennent sous une forme plus standard (celle qu'on trouve dans les questions de B.T.S. par exemple), la même situation que celle décrite comme situation d'évaluation dans la séquence sous le titre « exemple de relatif aboutissement » (voir chapitre 3). Elles ne sont proposées qu'après la séquence.

Q6. Si on éclaire avec une source de lumière blanche un objet bicolore, il paraît magenta (cette couleur est saturée) et blanc.

1. Si on place un filtre bleu devant cette source de lumière, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

Réponse correcte : Un filtre bleu ne laisse passer que la lumière bleue, la partie magenta de l'objet diffuse la lumière bleue, la partie blanche également, l'objet paraît bleu .

2. Si on place un filtre vert devant cette source de lumière, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

Réponse correcte : seule la lumière verte peut traverser le filtre vert, la partie magenta absorbe la lumière verte, elle paraît noire, la partie blanche diffuse la lumière verte, elle paraît verte .

3. Si on éclaire l'objet simultanément avec deux sources, l'une de lumière verte et l'autre de lumière rouge, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

Réponse correcte : la partie magenta ne diffuse que la lumière rouge, elle paraît rouge, la partie blanche diffuse les lumières rouge et verte, elle paraît jaune.

2.7.2. Les réponses

lumière →	1. bleue		2. verte		3. verte + rouge		
l'objet paraît →	B et B*	erreur ou partielle	N et V*	autres	R et J*	autres	sans réponse
TI	85%	15%	75%	25%	60%	15%	25%

*réponses correctes

2.7.3. Analyse des justifications

Les réponses à cette question sont raisonnées et ne se limitent pas à la réponse brute, c'est-à-dire à la couleur perçue. Nous distinguons dans les deux tableaux suivants les questions 1 et 2 où la composition de la lumière correspond au tiers du spectre et la question 3 où intervient l'addition de deux lumières.

Questions 1 et 2

Lorsque les étudiants répondent correctement à propos de la partie magenta de l'objet, la partie blanche est également bien traitée. Dans le tableau suivant, nous limitons l'analyse des justifications à cette partie magenta.

Couleur des corps (question 1 et 2) : fréquence d'apparition des termes
(le nombre de mentions est indiqué entre parenthèses)

Rôle du filtre bleu (ou vert) ↓		Rôle de l'objet ↓	L'objet paraît
absorbe* ou soustrait* (8)	la lumière sur l'objet	absorbe* (9)	bleu* (ou noir*) 85%
transmet * (6)	magenta qui →	transmet* (10)	
		est composé ou contient du rouge et du bleu (3)	
autres ou erreur (3)			10%
sans réponse (1)			5%

*éléments de réponses correctes

Le tableau (ligne 1) fait apparaître que 85% des réponses justes aux questions 1 et 2 correspondent aux étudiants qui ont effectué deux soustractions successives et indiqué correctement le résultat perçu. Les justifications s'accompagnent, parfois d'une analyse du rôle du filtre sur la lumière, toujours d'une allusion au rôle de l'objet sur la lumière reçue. Les réponses fausses (ligne 2) correspondent à un premier blocage sur l'analyse du rôle du filtre. Pour 10% du total, les couleurs sont ajoutées comme s'il s'agissait d'un mélange de matières. On retrouve là les difficultés observées dans le carnet de notes.

Question 3

Dans cette question s'ajoute aux opérations précédentes l'addition des lumières transmises par chaque filtre. Cette difficulté supplémentaire provoque une augmentation des non-réponses.

60% des étudiants sont capables d'effectuer la succession des opérations pour aboutir au résultat correct, même si tous les éléments du raisonnement, à chaque étape, ne sont pas explicités.

Couleur des corps (question 3) : Addition des lumières
Fréquence des réponses (le nombre de mention est indiqué entre parenthèses)

Rôle des filtres↓		Rôle de l'objet↓	L'objet paraît	fréquence
		l'objet blanc diffuse la lumière→	jaune* (10)	50%
absorbent* transmettent*(3)	addition de lumières*(14)	l'objet magenta transmet le rouge* (7) absorbe le vert* (5)	rouge* (13)	60%
	simultanément = superposition de filtres		noir	5%
faux				10%
sans réponse (5)				25%

*éléments de réponse corrects

2.7.4. Récapitulation

Le taux de réponses correctes - 85 % et 60 % respectivement à des questions de difficultés croissantes - et surtout le nombre de réponses argumentées confirment que cette question est perçue par les étudiants comme une situation pour laquelle ils disposent des éléments d'analyse. Outre les connaissances mémorisées qu'ils sont capables de mobiliser, ils montrent la capacité d'organiser ces connaissances dans les différentes étapes de l'analyse des situations décrites.

2.8. Synthèses des couleurs

2.8.1. La question

Q7. Il existe deux procédés de synthèse des couleurs, l'un est souvent qualifié de « mélange additif » et l'autre de « mélange soustractif ». Expliquez la différence entre les deux. Précisez les conditions d'observation en vous aidant éventuellement de schémas.

Cette question posée après la séquence est à rapprocher des questions 1 et 2 du questionnaire d'entrée (mélanges de peintures et superposition de matières) dont nous avons analysé les réponses à propos de l'analogie pigments /filtres (voir ci-dessus en 2.6.). Nous en rappelons les résultats dans le tableau suivant. On peut noter ici les résultats de la question 6 du questionnaire de l'enquête préliminaire (voir chapitre 1) où moins d'un tiers des citations concernent des procédés de création de couleurs se référant à la synthèse additive.

2.8.2. Les réponses

Nous distinguons les réponses correctes, soit de type verbal, soit utilisant des schémas accompagnés de légendes, de celles où est notée une **inversion** entre

les deux procédés. Les mélanges de pigments sont alors qualifiés de « mélange additif » et les filtres superposés de « mélange soustractif » :

« en peinture, il s'agit de la synthèse additive, en lumière de la synthèse soustractive ».

Cette catégorie de réponses représente plus de la moitié de l'effectif avant enseignement.

	Réponses correctes		Réponses fausses	
	verbal*	schéma*	inversion	je ne sais pas
TI « avant »	20%	-	65%	15%
TI « après »	55%	5%	15%	25%

* réponse correcte

Dans les explications données après la séquence, les étudiants développent plus volontiers le point « mélange additif ». Nous indiquons dans le tableau suivant la fréquence des éléments d'explication corrects (non exclusifs) repris dans leurs réponses.

Tableau « après » : synthèses additive et soustractive

mélange additif	mélange soustractif
addition ou superposition de lumières 55%	soustraction de lumière ou absorption sélective 30%
addition ou superposition de lumières sur un écran blanc ou dans l'oeil 25%	soustraction de lumière (ou absorption sélective) obtenue par superposition ou mélange de matières 30%
schéma 5%	
Primaires R V B 50%	Primaires J M C 10%

2.8.3. Points marquants

Dans les 60% de réponses correctes (de type verbal ou avec schémas), les termes « additif » et « soustractif » sont associés à une conceptualisation correcte de la lumière colorée et à l'idée de soustraction de lumière par la matière. Les étudiants oublient de citer les primaires de la synthèse soustractive, qu'ils connaissent pourtant. Ceci montre que ces réponses ne constituent pas la récitation de règles apprises, mais que l'accent est mis au contraire sur les éléments d'explication. D'autre part, étant donné le caractère nouveau pour eux de la synthèse additive, les étudiants s'attachent à en donner une description plus complète que pour la synthèse soustractive.

2.9. Contraste simultané

2.9.1. La question

Q8. Une expérience d'ombre colorée est décrite ainsi : « à la lumière du jour on plaçait un objet devant un mur blanc, on éclairait le tout avec de la lumière rouge, l'ombre portée de l'objet sur le mur apparaissait verte » (ITTEN, *Art de la couleur*).

1. Avez-vous déjà observé le même phénomène ? **oui** **non**

2. Cette affirmation vous paraît :

vraie **fausse** **je ne sais pas**

Justifiez votre réponse :

Rappelons qu'un phénomène analogue a été observé et analysé au cours de la séquence. Sans avoir fait l'objet d'une étude détaillée, trop complexe, il a été situé comme dû au fonctionnement du système visuel.

2.9.2. Les réponses

	1. observation		2. affirmation		
	oui	non	vraie *	fausse	je ne sais pas
TI avant	40%	60%	60%	15%	25%
TI après	90%	10%	70%	20% **	10%

* réponse correcte, ** ombre cyan (justification correcte)

L'affirmation est vraie, avant la séquence, pour ceux qui ont déjà fait l'observation :

« en montagne, en fin de journée sur la neige, l'ombre des bosses en lumière rasante orangée est bleue ».

Elle l'est aussi pour ceux qui connaissent l'ouvrage cité :

« dans sa théorie des contrastes de couleur, le rouge est associé au vert »

ou d'autres « selon la loi de Chevreul, un rayonnement coloré existe autour de certains objets colorés, par exemple le rouge et sa complémentaire verte ».

L'affirmation est « fausse » avec une justification correcte (**), dans 20 % des réponses après la séquence, parce que la teinte de l'ombre n'est pas correctement décrite par Itten : « L'ombre devrait apparaître cyan... ».

Le phénomène est identifié comme réel par la quasi totalité du groupe « après ».

2.9.3. Analyse des justifications

Les catégories d'analyse des justifications à cette question, indépendamment du fait que l'affirmation paraisse « vraie » ou « fausse », peuvent être établies selon la **cause** que les étudiants attribuent au phénomène (le fonctionnement du système oeil-cerveau) et selon les **éléments d'analyse** de la situation qu'ils

explicitent. Nous porterons une attention particulière au fait que la lumière y soit ou non mentionnée.

Ces catégories non exclusives et leur fréquence relative, avant et après la séquence, sont décrites, puis récapitulées dans le tableau ci-dessous.

- 1 - C'est un **phénomène visuel** (ligne 1), associé correctement au phénomène de **contraste simultané** ou, à tort, au contraste successif. La lumière est citée dans le premier exemple, alors qu'elle ne l'est pas dans le second :

« *Le phénomène des ombres colorées en lumière du jour est dû au contraste simultané, c'est-à-dire que l'œil perçoit automatiquement la couleur complémentaire de celle de la lumière qui éclaire l'objet, ici le rouge* » (après),

ou « *si l'on fixe longtemps un objet rouge et que l'on ferme soudain les yeux, nous observons à la place de l'objet une forme de couleur verte* » (avant).

- 2 - C'est un phénomène qui se produit dans certaines conditions où **intervient de la lumière** (ligne 2) :

« *a priori cela ne semble pas logique* »

« *l'ombre portée est verte, couleur complémentaire de la lumière rouge, derrière l'objet sur le mur, où la lumière ne passe pas, bloquée par l'objet* » (après),

« *si la lumière avait été jaune, l'ombre serait violette* » ou encore

« *en lumière rouge, l'ombre est cyan* ».

- 3 - C'est une **règle issue des lois du contraste des couleurs** (ligne 3), sans référence ni à la lumière, ni à l'œil,

- soit considérée comme une **propriété de la couleur** :

« *le vert est complémentaire du rouge* » ;

- soit comme une **propriété de l'ombre rapportée à la couleur de l'objet** :

« *L'ombre est toujours de la couleur complémentaire de l'objet* ».

- 4 - Nous ajoutons dans le tableau (ligne 4) la catégorie « *je ne sais pas* ».

Tableau « contraste simultané » : types de justification et fréquences relatives

TI avant	types de justification	TI après
10%	1. phénomène visuel* :	30%
-	avec référence à la lumière (contraste simultané)*	30%
10%	sans référence à la lumière (contraste successif)	-
10%	2. référence à la lumière** sans référence au phénomène visuel	30%
30%	3. règles du contraste de couleurs (sans autre référence)	20%
50%	4. je ne sais pas	20%

* réponses correctes, ** éléments de réponse corrects

2.9.4. Traits marquants dans les résultats

Les évolutions les plus marquantes sont, d'une part, la référence à la lumière faite dans 60% des réponses après la séquence (contre 10% avant), que le système visuel soit mentionné ou non, et, d'autre part, la diminution des réponses « je ne sais pas ».

Les observations seulement associées aux règles de contraste des couleurs diminuent après la séquence (20% contre 30% avant (ligne 3)), tandis qu'après la séquence, les explications faisant intervenir la lumière diffusée par la plage voisine de la zone d'ombre augmentent (30% contre 10% avant (ligne 2)).

On note également qu'après la séquence, un tiers des étudiants évoque l

e fonctionnement du système visuel, (contre 10% avant), certains ajoutant même : « *je n'ai pas compris le fonctionnement de l'oeil, certains détails m'échappent encore* ». C'est là un point non négligeable sur lequel nous reviendrons, mais qui témoigne d'une prégnance encore limitée (encore que la question soit très ouverte) de l'idée que le fonctionnement de la rétine et du cerveau, en bout de chaîne, est déterminant, en particulier dans ce phénomène.

2.10. Points forts retenus par les étudiants

Si vous avez mieux compris les phénomènes de couleur au cours de vos enseignements précédents, quels points vous ont le plus marqué ?

Ce qui a le plus marqué les étudiants, dans la séquence, est ce travail de conceptualisation de la lumière, cité par une moitié d'entre eux :

- ou
- « *Tout ce qui concerne la lumière, soustraction, addition...* »
 - « *Le fait de s'être rendu compte que l'addition de lumières colorées et l'addition de pigments ne donnaient pas le même résultat. A l'inverse, des filtres et des pigments de même couleur qui fonctionnent de la même façon* »
 - « *Le fait que l'on puisse lier (par l'étude et les calculs) la matière à un élément qui paraît aussi insaisissable que la lumière* ».

Pour quelques-uns dans ce groupe, le rôle de l'oeil et de la perception visuelle est mis en opposition avec la conception initiale de couleur comme matière :

- « *La relativité de la perception de la couleur, qui n'est pas une matière en soi* ».

Quelques remarques des étudiants font apparaître la prise de conscience d'une évolution dans leur façon d'envisager la couleur.

3. EVALUATION EXTERNE (DETAIL)

3.1. Introduction

Un questionnaire identique à celui de l'évaluation finale interne a été proposé à trois groupes différents en janvier 1993. Ces trois groupes ont suivi, au cours de l'année précédente 1991-1992, un enseignement sur la couleur dans le cadre d'un cours de sciences physiques en référence à des intitulés de programmes très voisins que nous donnons en annexe IV. Les trois groupes sont des groupes d'étudiants de deuxième année préparant des diplômes d'arts appliqués dans des écoles équivalentes (écoles Duperré et Boule). A travers le choix professionnel des élèves et la personnalité de leurs enseignants, on peut néanmoins s'attendre à des compétences légèrement différentes dans chacun de ces groupes. Il n'a pas été possible de disposer de groupes plus proches pour une comparaison externe, compte tenu de la spécificité du public visé.

L'enseignant de sciences physiques de l'année en cours a annoncé une date de passation du questionnaire et son thème. S'agissant d'un questionnaire d'évaluation des connaissances à long terme sur le sujet, non soumis à une notation, les élèves pouvaient rendre leurs réponses anonymes. Le groupe TE (Plasticiens) qui comporte 18 réponses (sur un effectif de 22 élèves) est le seul à avoir suivi la séquence décrite précédemment. Le groupe C1 (S.T.S. architecture intérieure) compte 17 réponses (sur 24 élèves) et le groupe C2 (Diplôme métier d'art) en compte 14 (sur 18 élèves). Ces deux derniers groupes ont suivi un enseignement classique.

Nous comparons simplement le nombre de réponses d'un même type dans chaque groupe. Les effectifs sont faibles, mais comme pour l'évaluation interne, des résultats exprimés en valeur relative devraient faciliter la comparaison (un individu représente 5 % de l'effectif global environ).

Réponses brutes et commentaires verbaux, que nous regroupons en catégories, sont visualisés par des histogrammes et exprimés en pourcentages des effectifs de chaque groupe.

Cette section est consacrée à une analyse détaillée des réponses à chacune des questions.

3.2. Couleurs de l'arc-en-ciel

3.2.1. La question

1. Voit-on toutes les couleurs dans l'arc-en-ciel ?	oui	non	je ne sais pas
Justifiez votre réponse			

3.2.2. Les réponses

	oui	non*	je ne sais pas
C1 (N = 17)	35 %	65 %	0 %
C2 (N = 14)	0 %	95 %	5 %
TE (N = 18)	35 %	60 %	5 %

* réponse correcte

La réponse correcte « non » est quasi unanime dans le groupe C2 et représente les deux tiers des réponses des groupes C1 et TE.

3.2.3. Analyse des commentaires des réponses

Les justifications données peuvent être classées selon les mêmes rubriques que dans l'évaluation interne, le critère principal retenu étant la référence à la lumière blanche et à sa décomposition.

1. *Aucune référence à la lumière : arc-en-ciel comme « palette de couleurs »*

Dans ce groupe de réponses où la couleur est traitée avec le seul vocabulaire de la peinture, les réponses typiques sont :

« Oui, le blanc et le noir ne sont pas considérés comme des couleurs » ;

« Non, on ne voit que 7 couleurs primaires et secondaires ».

2. *Spectre de la lumière blanche et toutes les couleurs*

La référence à la décomposition de la lumière blanche est explicite,

« Oui, on voit toutes les couleurs du spectre chromatique que notre oeil peut percevoir »

ou « Non, on ne voit pas les U.V. et IR ».

Ces réponses sont compatibles avec l'association couleur / longueur d'onde.

3. *Spectre de la lumière blanche, mais autres couleurs...*

Aux couleurs observées par décomposition de la lumière blanche, s'ajoutent soit les couleurs obtenues par mélange de matières,

« On voit toutes les couleurs qui composent la lumière blanche..., mais il y en a d'autres obtenues par mélange opaque »,

soit les couleurs obtenues par addition de lumières,

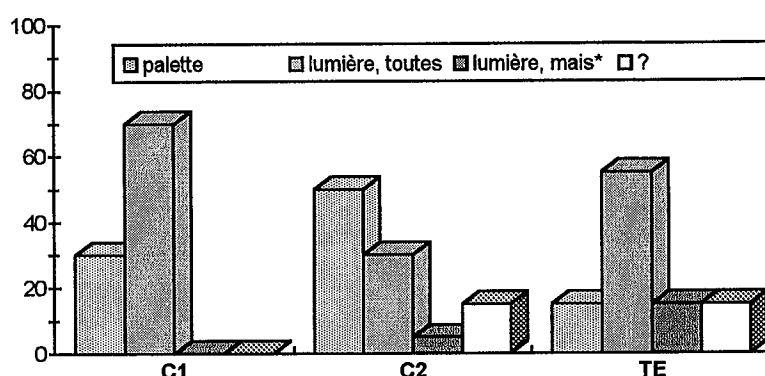
« Les couleurs extrêmes ne sont pas mélangées ».

C'est sous cette dernière rubrique que rentre la mention de la couleur pourpre ou magenta obtenue, par exemple, par addition des radiations extrêmes du spectre de la lumière blanche.

Tableau 4.3. « Arc-en-ciel » : types de justifications et fréquence relative.

types	exemples	C1	C2	TE
1. « palette de couleurs » (ou pas de mention de « lumière »)	« oui, 6 ou 7 couleurs » « non, il existe d'autres couleurs »	30%	50%	15%
2. les couleurs de l'arc-en-ciel sont celles du spectre de la lumière blanche...	« oui,... on voit toutes les couleurs du spectre » « non,... les U.V. et I.R. ne sont pas visibles »	70%	30%	55%
3. spectre de la lumière, mais pas toutes les couleurs...*	...« car addition de lumières »* ...« car mélange de couleurs »*	0%	5%	15%
pas de justification (?)		0%	15%	15%

* réponse correcte



3.2.4. Points marquants

70% des commentaires des groupes C1 et TE (lignes 1 et 2) se réfèrent clairement à la lumière et sa décomposition, alors que, dans le groupe C2, il n'est fait aucune mention de la lumière et le vocabulaire utilisé ne se réfère qu'à la peinture pour 50% des commentaires (ligne 1).

Pour le groupe C1, toutes les réponses où est mentionnée la lumière sont compatibles avec l'adhérence couleur et longueur d'onde, contre 55% dans le groupe TE (ligne 2). L'argument des radiations U.V. et I.R. invisibles est ici le plus souvent utilisé dans les 3 groupes.

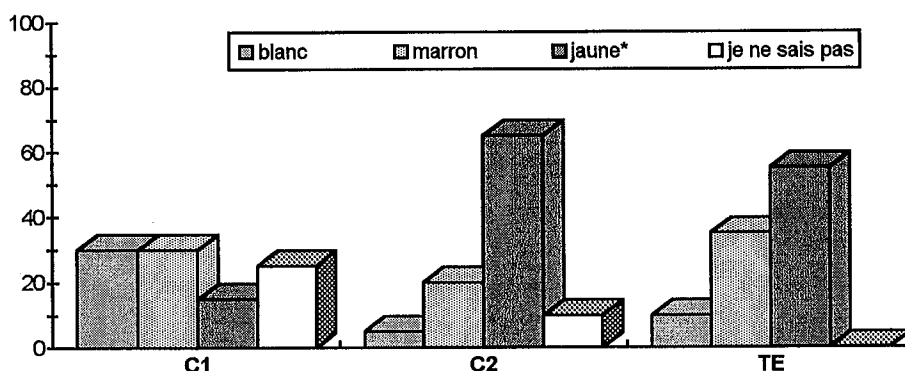
3.3. Addition de lumières

3.3.1. Les questions et les réponses

Q2.1. Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte. Qu'observe-t-on, là où les faisceaux se superposent ?

	du blanc	du marron	du jaune *	je ne sais pas
C1	30%	30%	15%	25%
C2	5%	20%	65%	10%
TE	10%	35%	55%	0%

* réponse correcte



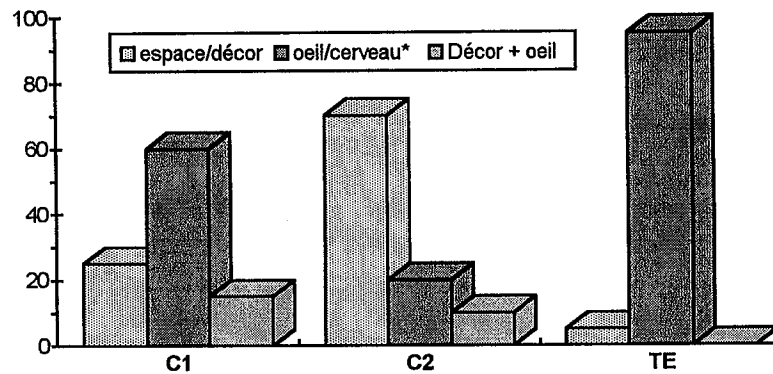
Le groupe C1 répond en utilisant soit les règles du mélange des peintures, soit la notion de couleurs complémentaires mais avec la confusion entre « rouge » et « magenta », et donne majoritairement des réponses fausses. Par contre, pour les groupes C2 et TE, c'est le taux de réponses correctes qui est majoritaire et sensiblement le même pour les deux groupes.

Q2.2. Où se crée cette couleur ?

- dans l'espace, là où les faisceaux se rencontrent..... ☐
 sur le décor ☐
 dans l'oeil de l'observateur (sur la rétine) ☐
 dans le cerveau de l'observateur ☐

	espace/décor	oeil/cerveau* (seulement)	décor/espace + oeil
C1	25%	60%	15%
C2	70%	20%	10%
TE	5%	95%	0%

* réponse correcte



3.3.2. Analyse des réponses

Des disparités entre les groupes apparaissent nettement. Pour le groupe C2, la couleur se crée dans l'espace, à l'endroit où les faisceaux se rencontrent, ou sur le décor : le rôle de l'oeil et du cerveau dans la vision n'est pas retenu (1 seul commentaire).

Pour le groupe C1, les réponses sont fréquemment commentées. L'action de la lumière pour provoquer la vision est comprise et exprimée plus ou moins clairement :

« La couleur d'un objet est déterminée par les rayonnements colorés émis par cet objet. Ces rayons sont perçus par l'oeil et transmis au cerveau par l'intermédiaire de la rétine et du nerf optique. C'est le cerveau qui analyse ces informations et nous définit la couleur de l'objet » (C1-7)

ou dans cette autre réponse, fautive quant à l'interprétation, où « couleur » est associé à « onde » :

« Dans l'espace se crée un phénomène de superposition de couleurs, donc crée une onde différente et c'est le cerveau qui reconstitue la couleur. En soi, la couleur n'existe pas, c'est le phénomène d'onde. Si on voit rouge, c'est que toutes les ondes pénètrent l'objet sauf le rouge » (C1-14).

Mais les mêmes élèves n'ont pas une connaissance bien intégrée des règles de synthèse additive,

« On obtient du blanc car l'addition des ondes colorées rouge et verte s'apparente au spectre de la lumière blanche » (C1-7).

C'est ce qu'indique un schéma où le spectateur dirige son regard (—→) vers l'écran et s'interroge : *« du blanc en lumière ? du marron en peinture ? » (C1-16)*

Lorsque la couleur comme réponse perceptive a été acceptée, les commentaires l'indiquent :

« la surface renvoie les longueurs d'onde qu'elle n'absorbe pas, celles-ci s'impressionnent sur la rétine, et sont alors identifiées par le cerveau qui en fait la synthèse » (TE-2)

ou

« c'est dans l'oeil que se crée cette couleur » (TE-15).

3.3.3. Points marquants

Le groupe C2 dispose de connaissances techniques (65% de réponses correctes), mais non intégrées dans une compréhension du rôle de l'oeil (20% de réponses correctes). Le groupe C1 dispose de connaissances sur la perception (60%), sans connaissances des lois de la synthèse additive (seulement 15% de réponses correctes). Dans le groupe TE, le découplage entre aspect technique et aspect perceptif n'apparaît pas. Dans chacun de ces domaines, les performances du groupe TE sont respectivement équivalentes à celles du groupe le meilleur (C2 pour les connaissances techniques et C1 pour la prise en compte de la vision).

3.4. Croisement de faisceaux Laser

3.4.1. La question

Q3. Deux faisceaux laser, l'un rouge et l'autre vert, se croisent dans l'espace dans une zone Z. La couleur* de chaque faisceau est-elle la même avant et après avoir traversé la zone de croisement ?

* On emploie ici le terme couleur d'un faisceau pour désigner celle qu'on voit si on place un écran blanc coupant le faisceau.

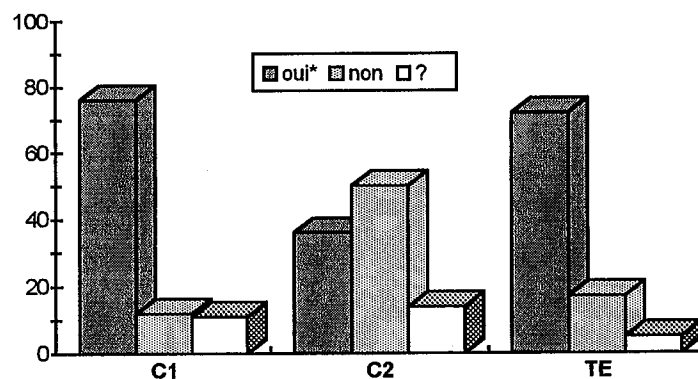
oui non je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

3.4.2. Les réponses

	oui *	non	je ne sais pas
C1	80%	10%	10%
C2	35%	50%	15%
TE	75%	15%	5%

* réponse correcte



3.4.3. Analyse des réponses

1. Dans les commentaires à propos de la réponse correcte « **oui** », les étudiants invoquent l'absence d'interaction entre les faisceaux laser (c'est alors plus une intuition qu'une connaissance) :

« *j'imagine que les ondes ne sont pas modifiées par d'autres ondes* » (C1-7) ;

ils y ajoutent, soit une distinction entre lumière et matière,

« *un flux lumineux du laser est une lumière et non une matière, elle ne se mélange pas* » (TE-1) ;

soit une modification **locale** dans la zone de croisement,

« *les deux faisceaux se croisant, ils changeront de couleur au moment où ils se croiseront* » (C2-5)

2. Les commentaires des réponses « **non** » portent sur une modification créée dans la zone de croisement et persistante. Dans ces réponses, l'argumentation s'appuie sur une assimilation entre couleur et matière :

« *Non, la couleur ne sera pas la même après le croisement, il y aura un mélange des couleurs* » (C2-14)

Sous la même rubrique on peut classer quelques réponses fausses invoquant une interaction des faisceaux analogue à celle d'un filtre,

« *Chaque faisceau de couleur joue le rôle d'un filtre pour l'autre* » (TE-7, C2-7, C2-13).

3. Certaines réponses sont inclassables, où les élèves refusent la question et se réfèrent probablement aux situations de visualisation de la lumière dans l'espace,

« *je ne sais pas car je ne passe pas mes week-ends en boîte de nuit* » (C1-15).

Tableau « Laser » : types de commentaires et leur fréquence relative

types de commentaires	C1	C2	TE
1. Pas de changement des radiations après*	75%	35%	50%
ce n'est pas un milieu matériel*	10%		10%
mais zone de croisement « jaune »	20%	35%	10%
2. superposition des faisceaux = superposition de filtres (changement de couleur durable)	10%	35%	10%
3. sans commentaires	15%	30%	40%

* réponse correcte

3.4.4. Points marquants

Les groupes C1 et TE se distinguent du groupe C2 par un fort taux de bonnes réponses. Plus d'un tiers dans ce dernier groupe considèrent que des lumières colorées qui se croisent s'affectent durablement.

Cette question n'a pas fait l'objet d'un traitement particulier au cours de la séquence, cela donne d'autant plus de poids au fait que le groupe TE ait des réponses correctes analogues à celles du groupe C1.

Néanmoins, le groupe C1 manifeste plus d'aisance dans la rédaction de commentaires. Le groupe TE rajoute peu de commentaires à sa réponse (40%) et semble moins à l'aise pour s'exprimer sur cette question.

3.5. Diffusion et couleur

3.5.1. La question

Q4. Entrant dans une salle sombre, un spectateur peut-il faire la différence entre un décor rouge éclairé par une lumière blanche et un décor blanc éclairé en lumière rouge ?

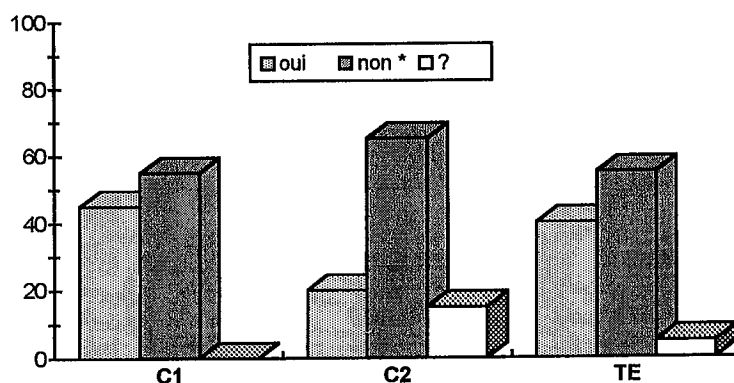
oui non je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

3.5.2. Les réponses

	oui	non*	je ne sais pas
C1	45%	55%	0%
C2	20%	65%	15%
TE	40%	55%	5%

* réponse correcte



La réponse correcte est majoritaire dans les trois groupes.

3.5.3. Analyse des justifications

Les commentaires indiqués dans les réponses peuvent se classer selon les mêmes critères que dans l'évaluation interne.

1. C'est la même couleur

La réponse correcte « **non** » est justifiée par le fait que le spectateur ne peut pas faire la différence entre les deux lumières colorées. Une référence explicite est faite à la **composition de la lumière**,

« ...Autrement dit, le spectateur perçoit dans les deux cas les mêmes ondes » (C1-7) ;

à cette idée de composition de la lumière s'ajoute parfois l'expression d'**une idée de tri** :

« Une surface de couleur rouge est désignée comme telle, lorsque recevant l'ensemble des radiations de la lumière blanche, elle ne renvoie que le rouge. De même une surface blanche qui ne reçoit que des radiations correspondant au rouge ne renverra que la lumière reçue » (TE-2).

ou

« On peut dire que pour deux sources lumineuses de même intensité, la surface rouge fera une sélection, elle renverra donc une émission plus faible ».

2. Ce n'est pas la même couleur

Cette différence de luminosité est invoquée dans certains commentaires aux réponses « oui ». Lorsque les commentaires ne font aucune référence à la lumière, la couleur est considérée comme une caractéristique du support :

« De plus on remarque bien la couleur du support par sa matière » (C1-3),

ou bien la couleur de la lumière s'ajoute à la couleur du support matériel :

« la lumière dénature la couleur, le décor blanc est rose » (C1-14)

3. Des justifications inclassables

Certains commentaires des « oui » refusent la précision « entrant dans une salle sombre » :

« cette salle n'est pas noire totalement, cela permet au spectateur de différencier le type de lumière ou de décor éclairé » (C1-2).

D'autres invoquent la lumière vue « de profil » lorsqu'elle se propage :

« dans le noir, la lumière rouge est plus visible que la lumière blanche » (C1-11),

« tout dépend de l'air porteur de la lumière colorée ou non » (C1-4),

ou encore les ombres différentes créées sur le décor.

Tableau « Diffusion et couleur »

éléments d'explications	C1	C2	TE
1. même couleur	55%	50%	40%
même composition de la lumière*	25%	15%	15%
même composition, parce qu'absorption et diffusion*	30%	5%	15%
aucune mention de lumière	-	30%	10%
2. ce n'est pas la même couleur	25%	10%	10%
la couleur de la lumière s'ajoute à la couleur du décor	25%	10%	5%
3. aucune explication ou autres	20%	30%	50%

* élément de réponse correcte

3.5.4. Points marquants

On note un pourcentage équivalent de bonnes réponses dans les trois groupes. Cependant, le taux de réponses non justifiées ou de commentaires inclassables est plus important dans le groupe TE (50 %), soit que la question présente un caractère d'évidence soit que les étudiants manifestent une certaine lassitude.

Le nombre de commentaires se référant à la lumière est plus important pour le groupe C1 (55 %) et pour le groupe TE (30 %) que pour le groupe C2 (20 %) dont pourtant la moitié des étudiants donnent la bonne réponse. Ceci témoigne de la difficulté à analyser la situation et à lier principalement la couleur perçue à la composition de la lumière diffusée par le support matériel.

Globalement, on note le faible taux de mention du phénomène d'absorption (30 % pour C1, 15 % pour TE, et seulement 5 % dans le groupe C2).

3.6. Filtres et pigments

3.6.1. La question

Q5. On superpose deux filtres devant l'objectif d'un projecteur de diapositives et on mélange deux pigments sur un support blanc. Le pigment 1 et le filtre 1 sont choisis de même couleur, ainsi que le filtre 2 et le pigment 2.

Observe-t-on les mêmes couleurs sur l'écran et sur la plage peinte ?

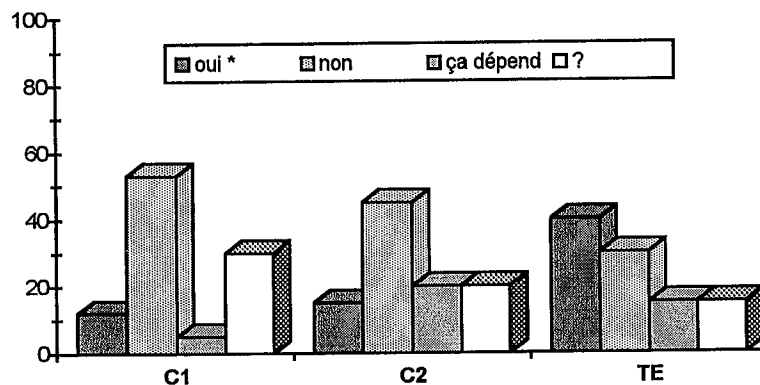
oui non ça dépend des couleurs choisies je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

3.6.2. Les réponses

	oui *	non	ça dépend	je ne sais pas
C1	10%	55%	15%	30%
C2	15%	45%	20%	20%
TE	40%	30%	15%	15%

* réponse correcte



3.6.3. Analyse des justifications

On notera pour cette question la fréquence dans les trois groupes des réponses « je ne sais pas ».

1. Analogie pigment / filtre : « pigments = filtres » *

Une justification correcte s'exprime le plus souvent par l'affirmation :

« les filtres et les pigments réagissent de la même façon à l'absorption de la lumière » (TE-10).

2. Superposition de filtres = « superposition » ou addition de lumières

Certains commentaires montrent que la **superposition des objets « filtres »** est comprise comme et assimilée ici à la **superposition des lumières colorées** par les filtres :

« en lumière, les couleurs se mélangent en synthèse additive, alors qu'en pigments, elles se mélangent en synthèse soustractive, on ne peut pas obtenir les mêmes résultats » (C1-5),

ou

« car le pigment est une matière alors que les filtres qui projettent une image sur un écran blanc sont des lumières (faisceau) » (C1-10).

3. Mélange de pigments \Rightarrow synthèse « additive »

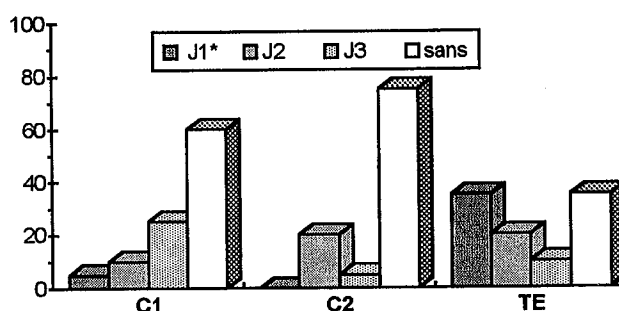
D'autres confondent **addition de pigments** et **synthèse additive** :

« Non, au niveau des filtres c'est le phénomène de la synthèse soustractive qui agit. Au niveau des pigments, c'est celui de la synthèse additive » (C1-6).

Tableau : filtres et pigments

Justifications	C1	C2	TE
1. oui, pigments = filtres*	5%	0%	35%
2. superposition de filtres = addition de lumières	10%	20%	20%
3. non, pigment « additif »	25%	5%	10%
4. aucune	60%	75%	35%

* réponse correcte



3.6.4. Point marquant

Un tiers du groupe TE donne à la fois une réponse et une justification correctes, alors que les réponses fausses ou non justifiées sont le cas pour la quasi totalité des élèves des groupes C1 et C2. Ce succès, très modeste, d'une part prend sa valeur par rapport aux autres groupes, d'autre part donne la mesure de la difficulté de la question.

3.7. Couleur des corps en lumière blanche et colorée

3.7.1. Les questions

Q6. Si on éclaire avec une source de lumière blanche un objet bicolore, il paraît magenta (cette couleur est saturée) et blanc.

6.1. Si on place un filtre bleu devant cette source de lumière, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

Réponse correcte : l'objet paraît bleu, la partie magenta diffuse la lumière bleue et la partie blanche également.

6.2. Si on place un filtre vert devant cette source de lumière, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

Réponse correcte : la partie magenta absorbe la lumière verte, elle paraît noire ; la partie blanche paraît verte.

6.3. Si on éclaire l'objet simultanément avec deux sources, l'une de lumière verte et l'autre de lumière rouge, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

Réponse correcte : la partie magenta ne diffuse que la lumière rouge, elle paraît rouge ; la partie blanche diffuse les lumières rouge et verte, elle paraît jaune.

Cette question est classique à la fin de l'étude de l'influence de la lumière sur la couleur d'un corps et correspond à la rubrique du programme commune aux trois groupes :

« *Influence de la lumière sur la perception de la couleur d'un objet* » ;

« *Problème général du rendu des couleurs par la qualité de l'éclairage* ».

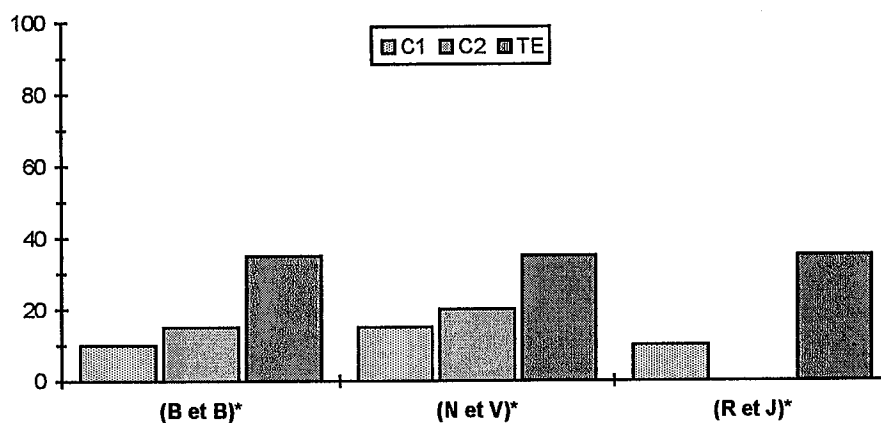
Elle nécessite une bonne compréhension des phénomènes : absorption sélective par le filtre et par l'objet coloré conduisant à envisager deux soustractions successives par rapport à la lumière blanche, composition simplifiée de la lumière colorée et réponse perceptive. Les réponses à ces questions ne sont sûrement pas mémorisables et nécessitent la mise en oeuvre d'un raisonnement.

3.7.2. Les réponses

Nous indiquons pour les trois questions successivement les réponses correctes, les réponses fausses et l'absence de toute réponse.

en lumière l'objet paraît→	1. bleue			2. verte			3. verte + rouge		
	(B et B)*	autres	?	(N et V)*	autres	?	(R et J)*	autres	?
C1	10%	85%	5%	15%	75%	10%	10%	85%	5%
C2	15%	85%	-	20%	65%	15%	0%	80%	20%
TE	35%	65%	-	35%	55%	10%	35%	55%	10%

* réponse correcte



Réponses correctes aux trois questions

3.7.3. Analyse des réponses

Le taux de réponses correctes est le même pour les trois questions dans le groupe TE. Lorsque l'objet magenta est éclairé en lumière verte (là n'intervient que l'absorption d'une lumière de couleur complémentaire), le taux de bonnes réponses atteint alors 15% et 20% pour les groupes C1 et C2.

Parmi les réponses fausses, certaines sont compatibles avec un raisonnement par addition de la couleur de la lumière et de la couleur de la matière,

soit comme s'il s'agissait de deux matières :

« *l'objet apparaîtra toujours bicolore. Le magenta deviendra violet et le blanc deviendra bleu par addition de couleurs* »,

« *magenta + bleu → violet* »,

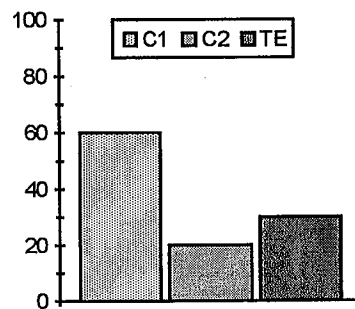
« *magenta + vert (bleu et jaune) → marron* »

« *blanc + vert + rouge → marron* »

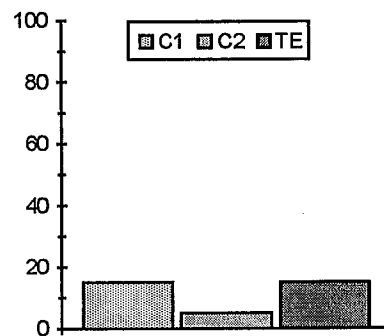
soit comme s'il s'agissait de deux lumières :

« *rouge + vert → blanc* ».

Les taux de telles réponses de type « addition de couleurs » sont donnés selon les groupes dans le graphique suivant :



Arrivés au terme de leur raisonnement et ayant produit une réponse, qui sera nécessairement juste ou fausse, les élèves y ajoutent peu de commentaires. Les éléments corrects de justification (mention de l'absorption sélective) ne sont que de 15% pour les groupes C1 et TE et ne dépassent pas 5% pour le groupe C2.



3.7.4. Points marquants

Le taux de réponses correctes est faible dans les groupes C1 et C2 (moins de 15% aux questions 1 et 3, 15% et 20% respectivement à la question 2) alors qu'un tiers des élèves du groupe TE montrent une grande stabilité sur l'ensemble des trois réponses. Ceux-là sont capables de mettre en oeuvre un raisonnement sur une grande partie de la chaîne.

3.8. Synthèses des couleurs

3.8.1. La question

Cette question est à rapprocher de la question portant sur l'analogie pigment et filtre, où intervient la synthèse soustractive, mais se présente comme une question de cours classique de type question de B.T.S.

Q7. Il existe deux procédés de synthèse des couleurs, l'un est souvent qualifié de « mélange additif » et l'autre de « mélange soustractif ». Expliquez la différence entre les deux. Précisez les conditions d'observation en vous aidant éventuellement de schémas.

3.8.2. Les réponses

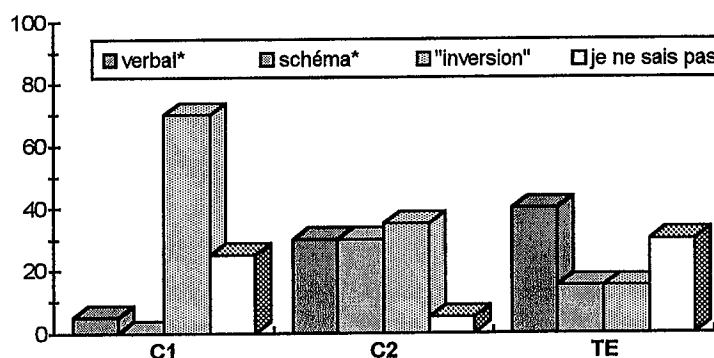
Les réponses sont données soit sous forme d'explication verbale, soit sous forme de schémas. Les réponses correctes comportent la mention de l'addition de lumières pour le mélange additif et la mention du mélange ou de la superposition de matières pour le mélange soustractif.

Les réponses fausses se traduisent par une **inversion** entre les deux procédés de création de couleurs par synthèse additive ou soustractive et par des erreurs à propos des couleurs primaires correspondantes. Ceci recouvre deux erreurs, déjà apparues dans la question « filtres et pigments » :

- le « mélange de couleurs » (au sens de mélange de lumières colorées) est assimilé au mélange de pigments, et les pigments sont qualifiés d'« additifs ».
- la lumière colorée est produite par des filtres qui agissent bien par synthèse soustractive. La lumière produite est confondue avec l'objet-filtre.

	Réponses correctes		Réponses fausses	
	verbal*	schéma*	« inversion »	je ne sais pas
C1	5%	0%	70%	25%
C2	30%	30%	35%	5%
TE	40%	15%	15%	25%

*réponse correcte



3.8.3. Points marquants

On notera l'important taux d'erreurs dans le groupe C1 (70 % des réponses), confirmant que l'aspect technique a été peu traité dans ce groupe.

Le taux de réponses correctes est équivalent dans les groupes C2 et TE, (60 % et 55 % respectivement) avec un taux d'erreurs plus faible dans le groupe TE (15 %).

Les réponses correctes du groupe C2 sont basées sur la mémorisation d'un schéma classique où les couleurs primaires de chaque procédé sont bien différenciées. Ce schéma n'ayant pas été utilisé dans le groupe TE, au cours de la séquence, les explications verbales correctes sont dominantes.

3.9. Ombre et contraste simultané

3.9.1. Les questions

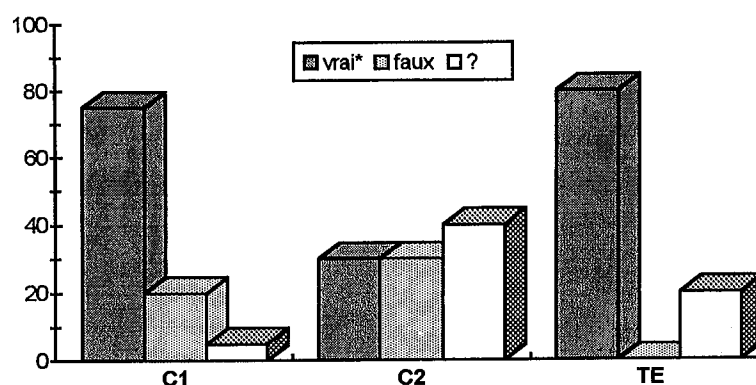
Q8. Une expérience d'ombre colorée est décrite ainsi : « à la lumière du jour on plaçait un objet devant un mur blanc, on éclairait le tout avec de la lumière rouge, l'ombre portée de l'objet sur le mur apparaissait verte » (ITTEN, *Art de la couleur*).

1. Avez-vous déjà observé le même phénomène ? **oui** **non**
 2. Cette affirmation vous paraît : **vraie** **fausse** **je ne sais pas**
 Justifiez votre réponse :

3.9.2. Les réponses

	1. observation	2. affirmation		
	oui	vraie *	fausse	je ne sais pas
C1	55 %	75 %	20 %	5 %
C2	15 %	30 %	30 %	40 %
TE	85 %	65 %	15 %**	20 %

* réponse correcte, ** ombre cyan (justification correcte)



3.9.3. Analyse des justifications

Ce phénomène d'ombres colorées par effet de contraste simultané est beaucoup mieux connu des groupes C1 et TE (75 et 80%) que du groupe C2 (30% des réponses).

Les commentaires à cette question peuvent se répartir entre quatre catégories, que nous récapitulons dans le tableau « contraste » en y ajoutant les fréquences relatives et qui reprennent celles utilisées dans l'évaluation interne.

1. Phénomène visuel

Une première catégorie situe le phénomène comme **phénomène visuel**. Cet aspect est privilégié et n'est pas accompagné de référence à la lumière. Parmi ceux-là, certains l'identifient correctement comme **contraste simultané** :

« lorsque l'on observe un carré rouge sur un fond blanc, l'oeil crée autour du carré la complémentaire, le vert. Il s'agit du **contraste simultané**, créé par l'individu » (TE-9, TE-2)

ou

« c'est une réaction du cerveau » (TE-3).

« Quand on voit du rouge, on ressent la complémentaire, c'est-à-dire le vert, l'oeil est saturé de rouge, il 'fabrique le vert' pour établir un équilibre » (C1-1, C1-7, C1-10)

Toutefois, certains assimilent à tort cette situation à une situation de **contraste successif** :

« C'est à cause de la persistance rétinienne » (C1-13)

« L'oeil ou plutôt le cerveau enregistre la couleur, puis lorsque l'oeil se déplace sur un support blanc, il transmet sa complémentaire » (TE-17, C1-3, C1-16, C2-4)

2. Référence à la lumière diffusée

Un deuxième groupe d'étudiants privilégie des arguments en **référence à la lumière diffusée** par la surface avoisinant la zone d'ombre :

« l'ombre est toujours colorée et cette ombre sera toujours la couleur complémentaire de la lumière » (C1-9),

ou bien ils considèrent l'affirmation comme fausse, car la teinte observée n'est pas verte, mais cyan, couleur complémentaire de la lumière rouge, « l'ombre apparaît cyan » (TE-4). Enfin, pour d'autres, en l'absence de lumière, l'ombre est noire : « une ombre n'est jamais colorée ».

3. Contraste de couleurs

Une troisième catégorie d'étudiants connaît le phénomène et le situe dans un ensemble de faits connus dans la littérature sur la couleur en art sous la rubrique « *interaction des couleurs* » ou « *contraste de couleurs* » (Chevreul 1839). Dans cette catégorie, la coloration de l'ombre n'est pas rapportée à la lumière mais à la **couleur de l'objet** :

« les objets ont tendance à s'auréoler de leur couleur complémentaire » (C1-4, C1-5)

« *c'est que l'objet est magenta* » ou encore « *il faudrait connaître la couleur de l'objet* »

et elle apparaît comme une propriété intrinsèque de l'ombre :

« *une ombre est toujours de la couleur complémentaire de l'objet* » (TE-18, TE-6)

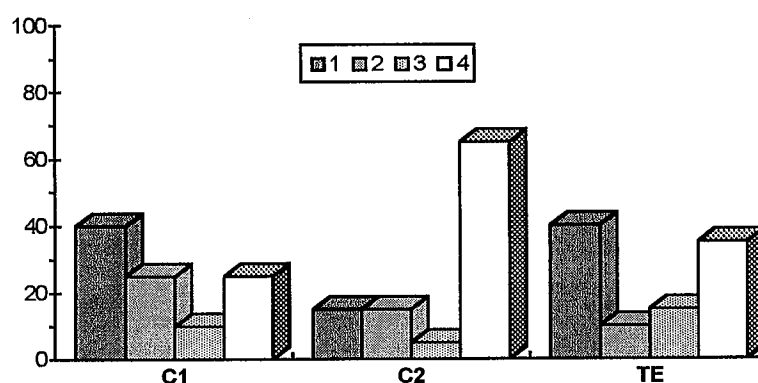
4. Je ne sais pas

Nous mettrons sous une quatrième rubrique les réponses du type :

« *je ne sais pas* » ou « *je pense que c'est vrai, mais je ne suis pas en mesure de le justifier* ».

Tableau « contraste » : types de justifications et fréquences relatives

types de justifications	C1	C2	TE
1. phénomène visuel (avec ou sans référence à la lumière)	40%	15%	40%
2. référence à la lumière (sans référence au phénomène visuel)	25%	15%	10%
3. contraste de couleurs (couleur complémentaire de l'objet)	10%	5%	15%
4. je ne sais pas	25%	65%	35%



3.9.4. Points marquants

Globalement, les groupes C1 et TE se distinguent du groupe C2, d'abord, par le fait qu'ils donnent une réponse, et ensuite, par le fait qu'ils évoquent beaucoup plus souvent le système visuel ou la lumière.

On trouve néanmoins, comme dans l'évaluation interne, peu d'étudiants qui attribuent le phénomène au fonctionnement du système visuel (taux de 40 % pour C1 et TE, 15 % pour C2).

Cela peut s'expliquer par la complexité de l'explication et l'ignorance des mécanismes précis. On note d'ailleurs à ce propos une dérive d'une analyse en termes de contraste simultané vers une autre en termes de contraste successif.

3.10. Points forts retenus par les étudiants

Si vous avez mieux compris les phénomènes de couleur au cours de vos enseignements précédents, quel point vous a le plus marqué ? (ou quels points ?)

Oubli ?...

Les élèves du groupe C2 s'expriment sur le fait que le sujet a été traité un an avant et qu'ils ont eu le temps d'oublier :

« C'est déjà loin » (C2-4)...

Les points le plus fréquemment cités sont ceux sur lesquels les étudiants ont eu à réfléchir par le biais des questions posées :

- le rôle de la lumière, sa composition,
- la synthèse additive et soustractive ou la différence entre lumière et matière,
- le rôle de l'oeil et les effets perceptifs.

Paradoxalement, les élèves du groupe C1 qui déclarent avoir mieux compris la synthèse additive et soustractive ont donné des réponses fausses, tandis que les élèves du groupe TE reconnaissent qu'il y a là une difficulté et que sur ce point ils ont progressé :

« Difficulté à me souvenir de la différence entre mélange additif et soustractif » (TE-17, TE-5),

« Rien de particulier, sinon de comprendre plus précisément le fonctionnement des deux synthèses colorées dont je ne connaissais que le résultat visuel » (TE-3).

Les élèves des groupes témoins expriment leur intérêt pour le sujet :

« C'est vraiment un phénomène qui m'intéresse..., mais les bases sont à reprendre »,

et manifestent que les questions posées leur ont permis de faire le point sur leurs connaissances.

4. CONCLUSION

Le groupe TE manifeste, par ses réponses justes et commentaires appropriés, des performances, d'un côté tout à fait comparables à celles du groupe C1, plus à l'aise lorsqu'il s'agit de la lumière (voir par exemple les questions sur l'arc-en-ciel et le laser), et d'un autre à celles du groupe C2, plus à l'aise sur les techniques (voir les questions sur l'addition de lumières et les synthèses). Certes les effectifs ne sont pas importants mais ils restent stables sur l'ensemble des réponses à des questions proches. L'ambition de nos objectifs n'a rien fait perdre sur chacun des terrains, ni sur celui de la physique, ni sur celui de la technique, ni sur celui de la vision. Compte tenu de ces populations, c'est un résultat notable.

L'hypothèse que les étudiants qui ont suivi la séquence parviennent à une compréhension relativement intégrée sur le long terme semble donc confirmée par cette évaluation externe. Cependant la présentation de détail, qui vient d'être faite question par question, ne permet pas d'apprécier pleinement la teneur de ce résultat. La synthèse qui suit (chapitre 5) a pour objet de caractériser plus globalement les « profils conceptuels » des groupes concernés à l'issue de l'enseignement.

CHAPITRE 5

SYNTHESE :

VERS LA DEFINITION D'UN PROFIL CONCEPTUEL

1. INTRODUCTION

L'étude détaillée qui précède fait apparaître une évolution (évaluation interne) et des différences (évaluation externe) dans les éventails de compétences caractérisant groupes expérimentaux et groupes de contrôle, à propos des phénomènes de couleur. Au passage, on note que chacun des groupes de contrôle semble présenter une dominante de compétences, l'un plus « physicien », l'autre plus « technicien ».

Ces éléments conduisent à rechercher une présentation des résultats qui, à la fois, préserve l'étendue de l'information recueillie sur chaque groupe et en offre une représentation globale. D'où l'idée de construire un outil pour caractériser un « profil conceptuel » de groupe.

Avant de détailler cet outil, nous pouvons reformuler notre question de recherche ainsi : dans quelle mesure la séquence se traduit-elle, chez les étudiants, par un « profil conceptuel » de sortie identifiable, que l'on puisse mettre en correspondance avec les intentions didactiques qui en ont guidé l'élaboration ?

Pour construire un outil de caractérisation des groupes, nous nous appuyons, pour chaque question, sur les éléments des réponses qui apparaissent les plus discriminants. Ceux-ci sont rassemblés, question par question, et accompagnés des résultats correspondants, dans une première partie de ce chapitre. L'ordre de présentation des questions n'est plus celui du questionnaire. Il reprend les critères de caractérisation des questions du chapitre précédent et prépare la présentation finale des profils conceptuels en mentionnant à la fin les questions dont la réponse nécessite le plus nettement une analyse en termes de chaîne, tandis que les autres sont regroupées par dominante de rattachement scolaire.

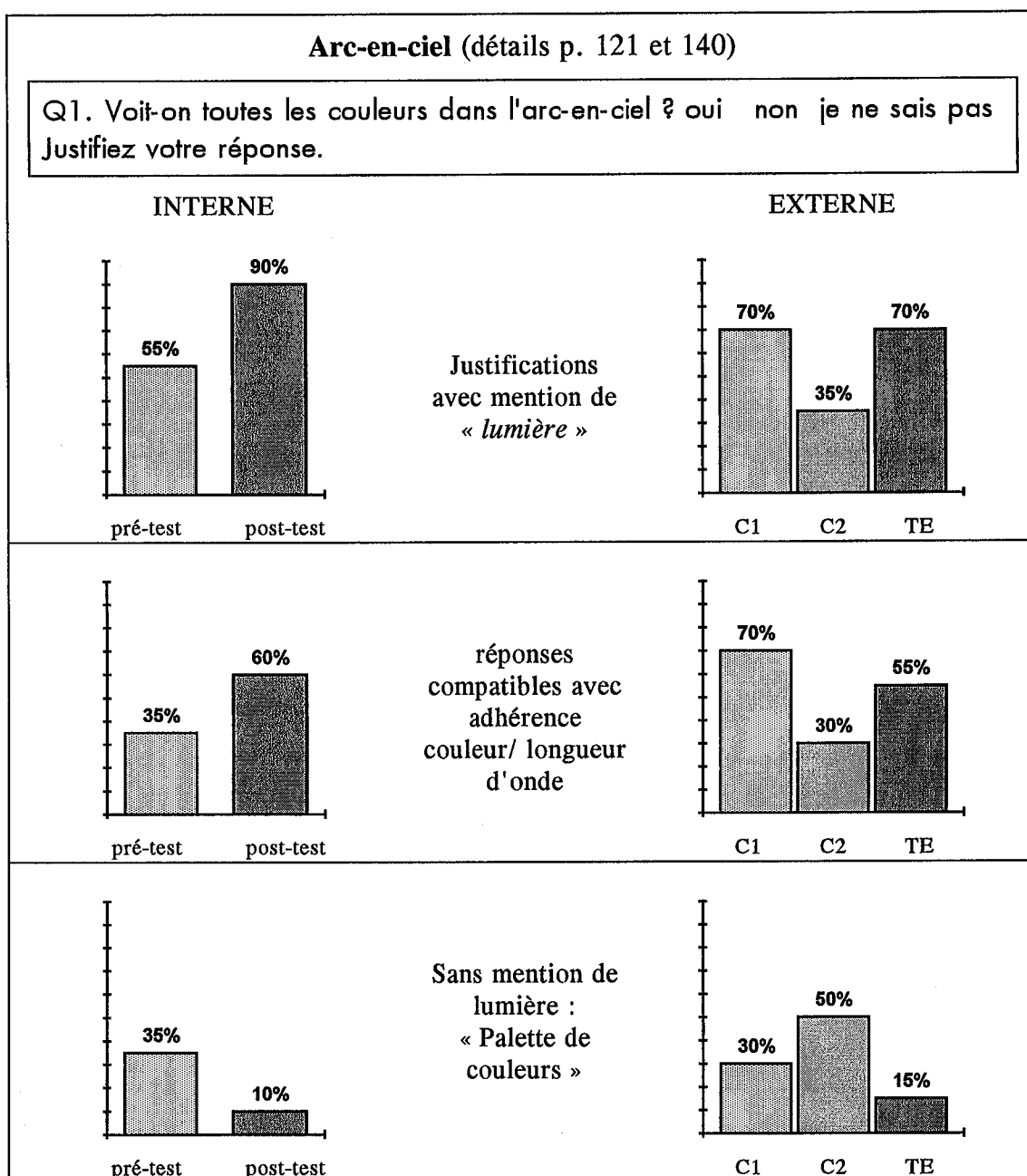
La section suivante présente et ordonne les choix faits en matière de couples « aspect de réponse / question » retenus comme porteurs d'information pertinente. Le terme *aspect* est pris ici au sens de point de vue privilégié sous lequel la réponse est donnée, selon la question posée. Il ne s'agit pas seulement de repérer de façon systématique une suite particulière de mots. Dans les aspects de réponse en cause figurent aussi bien ceux qui, du point de vue des objectifs de la séquence, sont « positifs », que ceux qui s'en écartent et sont qualifiés de « négatifs ».

Enfin la suite des taux d'occurrence de tels couples ou « profil conceptuel », est présentée pour tous les groupes impliqués dans l'évaluation, groupe test TI pour l'évaluation interne peu de temps après la séquence, groupe test TE et groupes témoins C1 et C2 pour l'évaluation externe, l'année suivant l'enseignement. La discussion finale s'appuie sur les profils obtenus.

2. LES RESULTATS PAR QUESTION

2.1. Questions peu discriminantes en termes de chaîne

2.1.1. Questions relatives à la physique : arc-en-ciel et laser

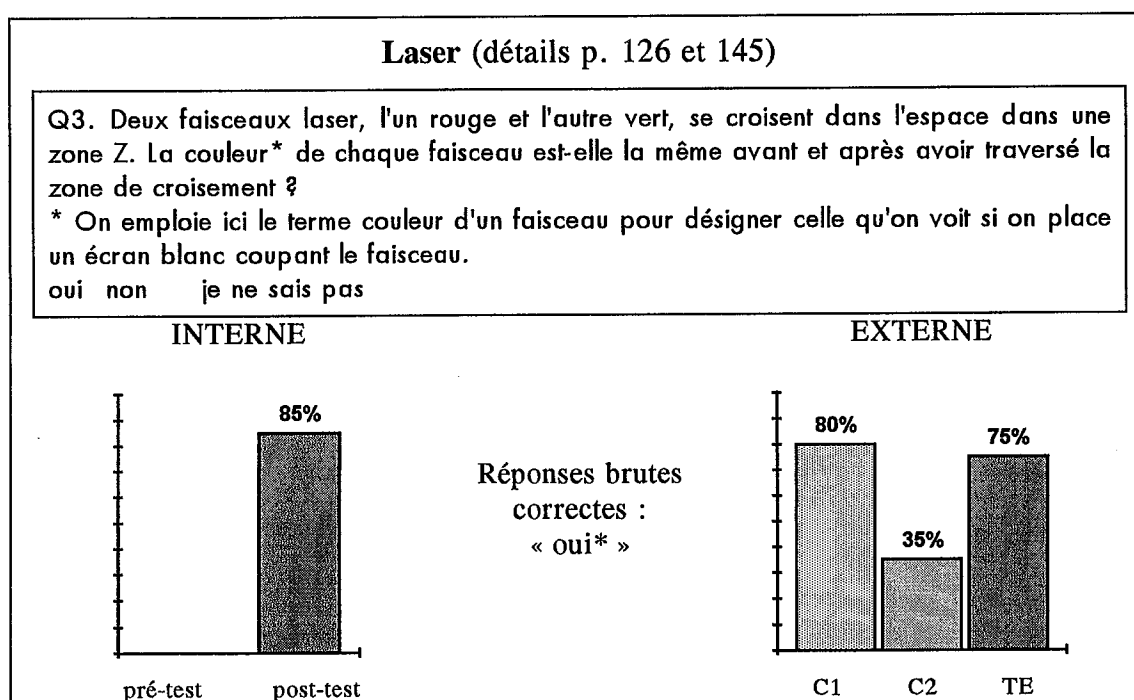


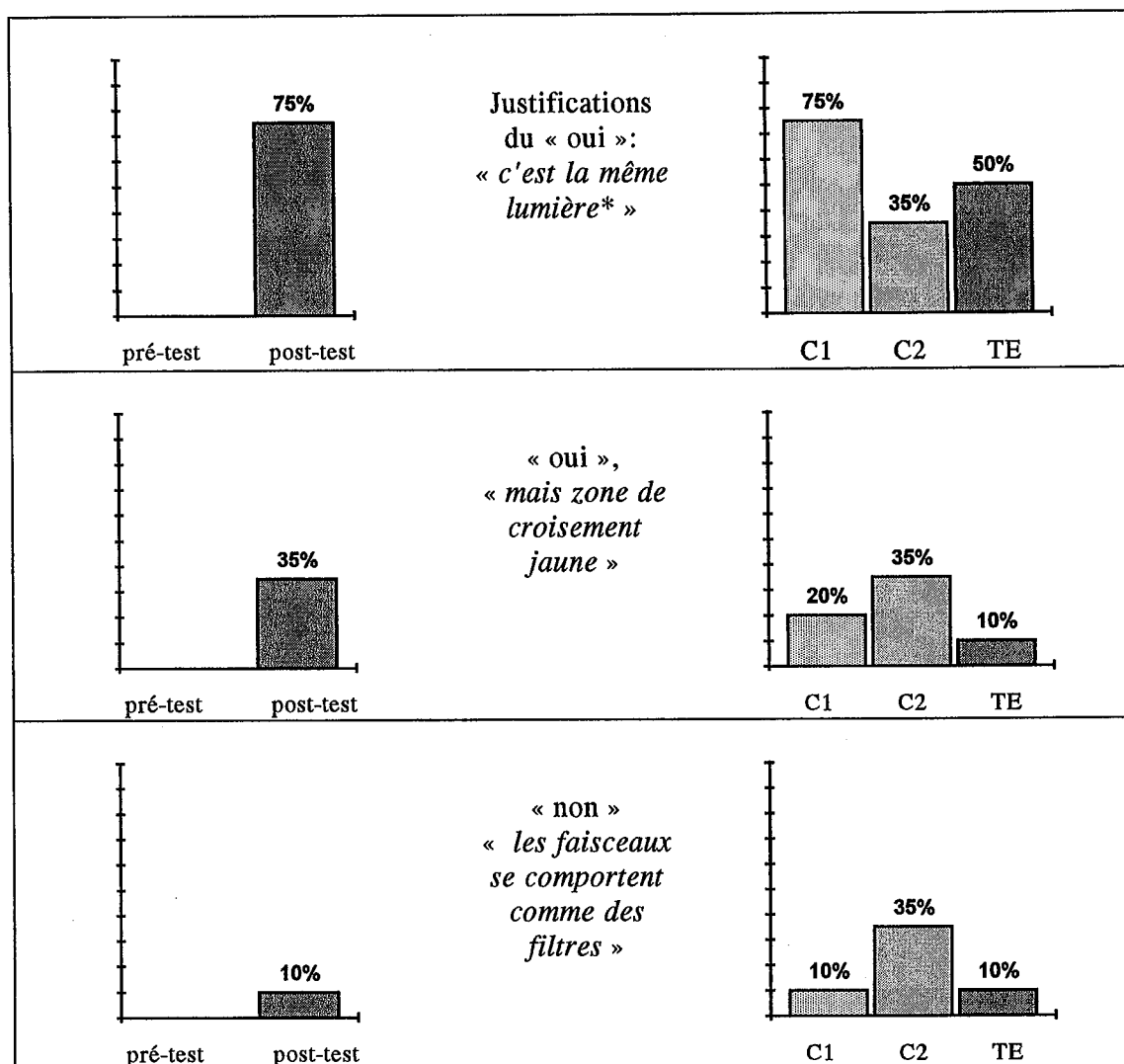
Cette question était initialement prévue pour tester la compréhension de l'ensemble de la chaîne, et en particulier, le fait qu'une couleur peut être perçue avec une lumière polychromatique. Les réponses se sont avérées, sur ce point, difficiles à interpréter.

Ici, comme dans l'enquête préliminaire et en cours de séquence, on observe peu d'analyses explicites complètes, et les réponses des étudiants se départagent essentiellement sur le critère : mention de la lumière ou non. De plus, une bonne réponse est disponible, alternative en termes de lumière, mais très incomplète quant à la perception, où est mentionnée l'existence des radiations infrarouges et ultraviolettes non visibles par l'oeil humain. On peut interpréter ceci par le caractère très physicien de la question qui provoque l'apparition d'un effet puissant : les connaissances sur la vision des couleurs passent à l'arrière plan par rapport aux connaissances de physique.

Ce sont donc les taux de présence du critère « **mention de la lumière** » que nous retenons ici comme particulièrement critiques pour cette question. De ce point de vue, l'évolution du groupe TI est bien marquée, tandis que les groupes C1 et TE montrent une nette supériorité par rapport au groupe C2.

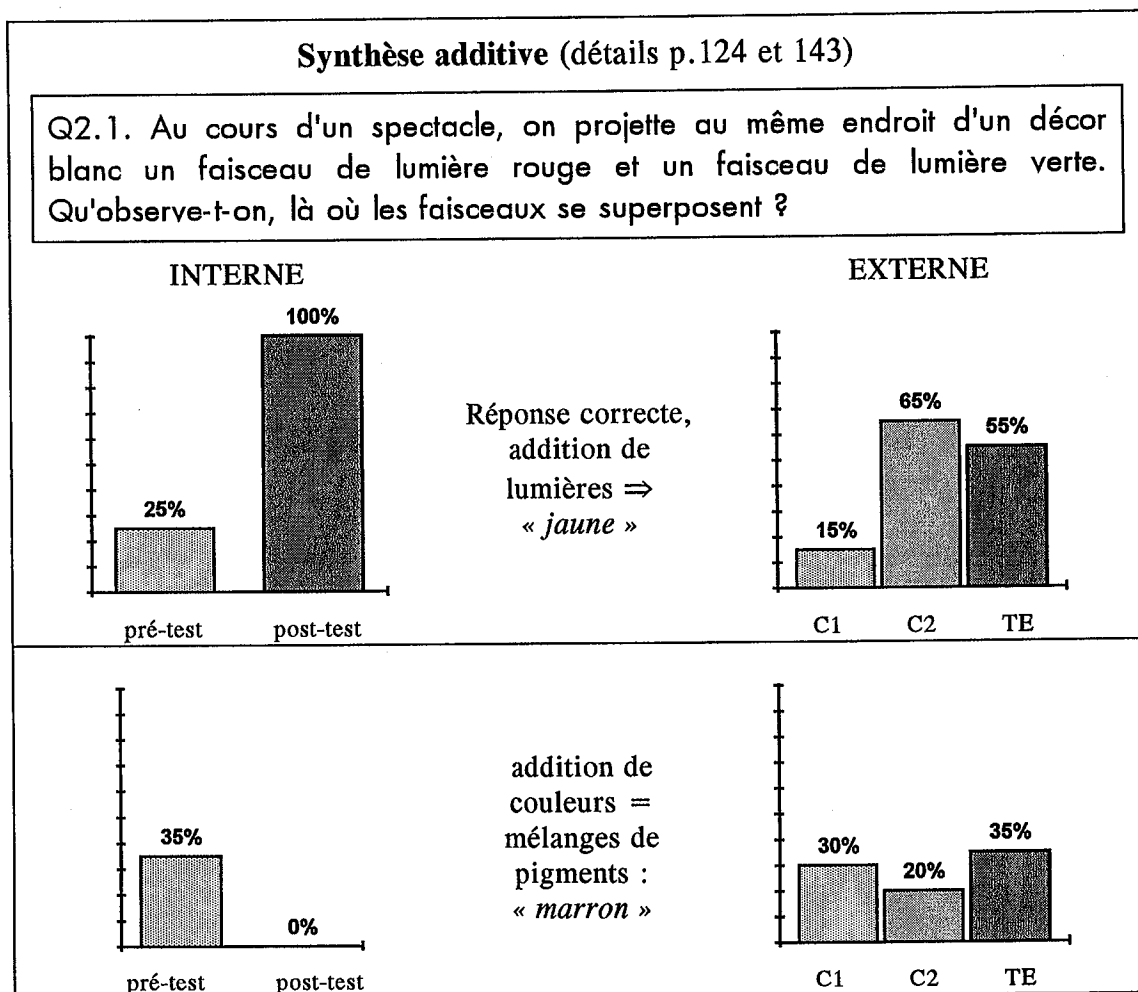
Le critère de connaissances relatives à la lumière est également retenu pour l'analyse de la question sur les faisceaux laser : le concept de lumière colorée dans l'espace donne lieu ici à des jugements d'étudiants rappelés ci-dessous.





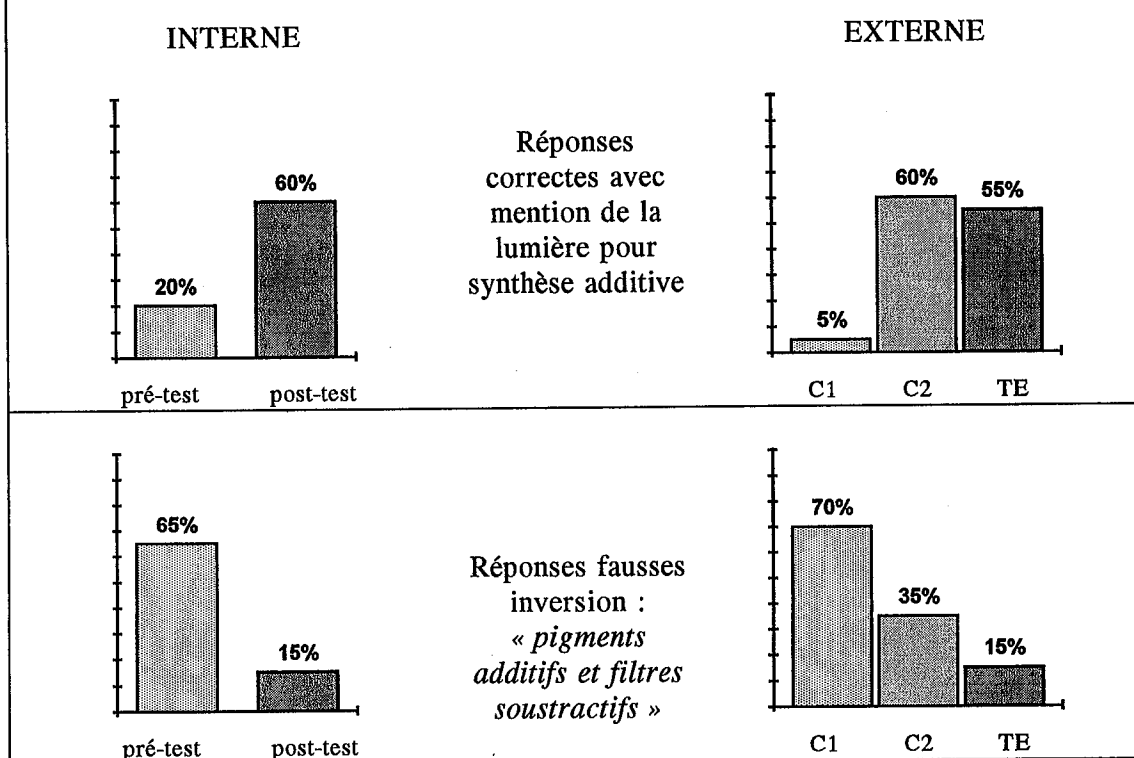
Pour cette question, comme pour la précédente, le domaine principal de rattachement scolaire est la physique. A travers les taux de réponses brutes et justifications correctes à ces deux questions, les groupes C1 et TE apparaissent comme plus familiers d'une analyse en termes de lumière que le groupe C2. Celui-ci manifeste des difficultés importantes dans l'expression d'une réponse en termes de lumière (50 % en Q1 et 70 % en Q3).

2.1.2. Des questions techniques : Synthèse additive et synthèses additive et soustractive



Synthèses additive et soustractive (détails p. 135 et 154)

Q7. Il existe deux procédés de synthèse des couleurs, l'un est souvent qualifié de « mélange additif » et l'autre de « mélange soustractif ». Expliquez la différence entre les deux. Précisez les conditions d'observation en vous aidant éventuellement de schémas.

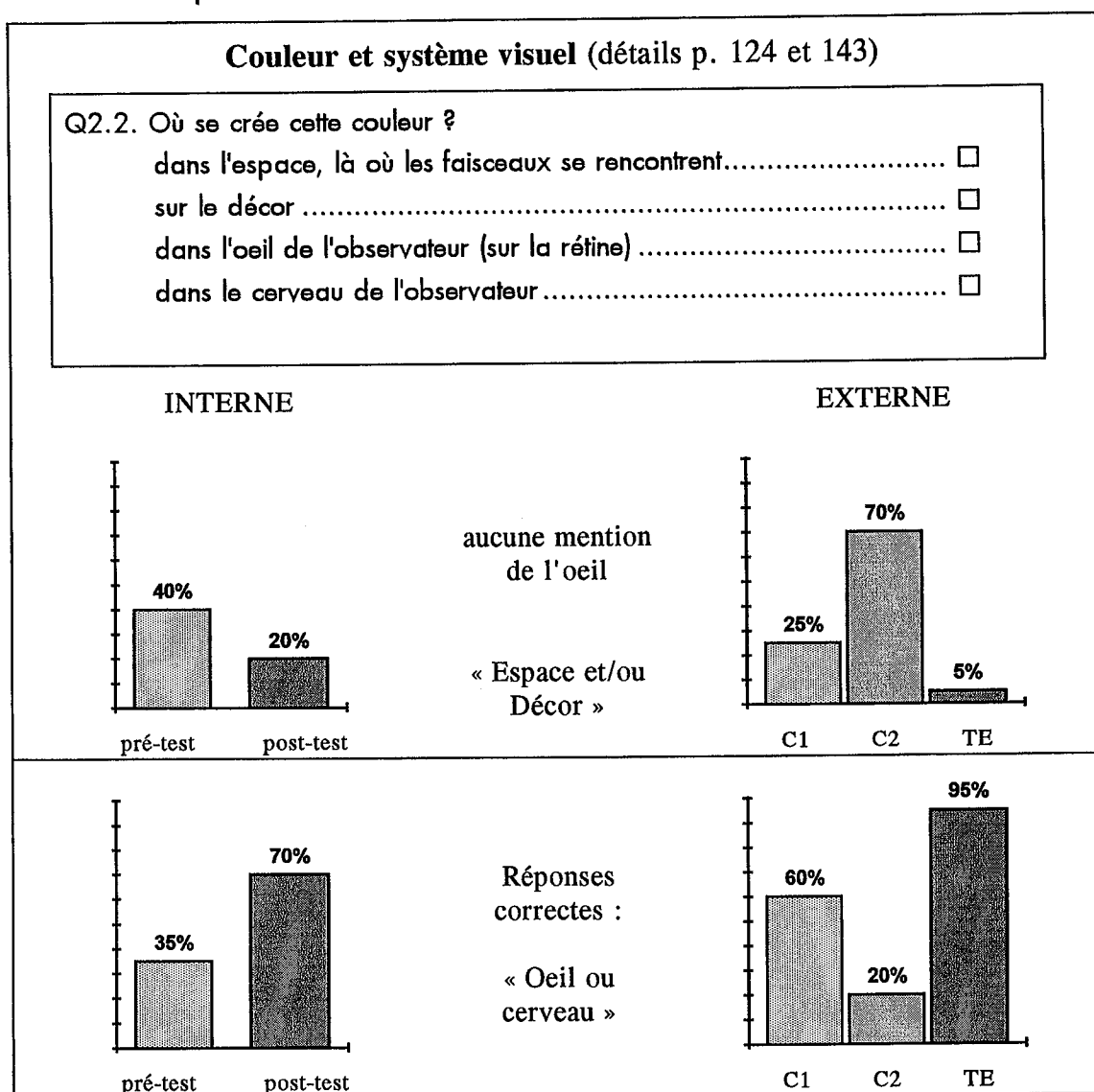


Dans les réponses de type « inversion », « le mélange additif s'applique pour le mélange de pigments colorés, le mélange soustractif s'applique pour la lumière ».

Pour ces deux questions traditionnellement abordées dans les cours de technologie ou à travers l'apprentissage des techniques, l'une simple et l'autre plus complète, on note l'homogénéité des réponses respectivement dans chaque groupe de l'évaluation externe. Le taux de réponses correctes du groupe test TE est équivalent à celui du groupe C2 qui se montre nettement plus performant, en ce qui concerne le domaine technique, que le groupe C1.

L'évaluation interne montre une nette évolution : diminution du taux de réponses fausses et augmentation du taux de bonnes réponses. La comparaison des résultats pour les groupes tests TI et TE montre la quasi permanence, un an après, des réponses où sont explicitées correctement les différences entre les deux procédés.

2.1.3. Des questions relatives à la vision et à la perception

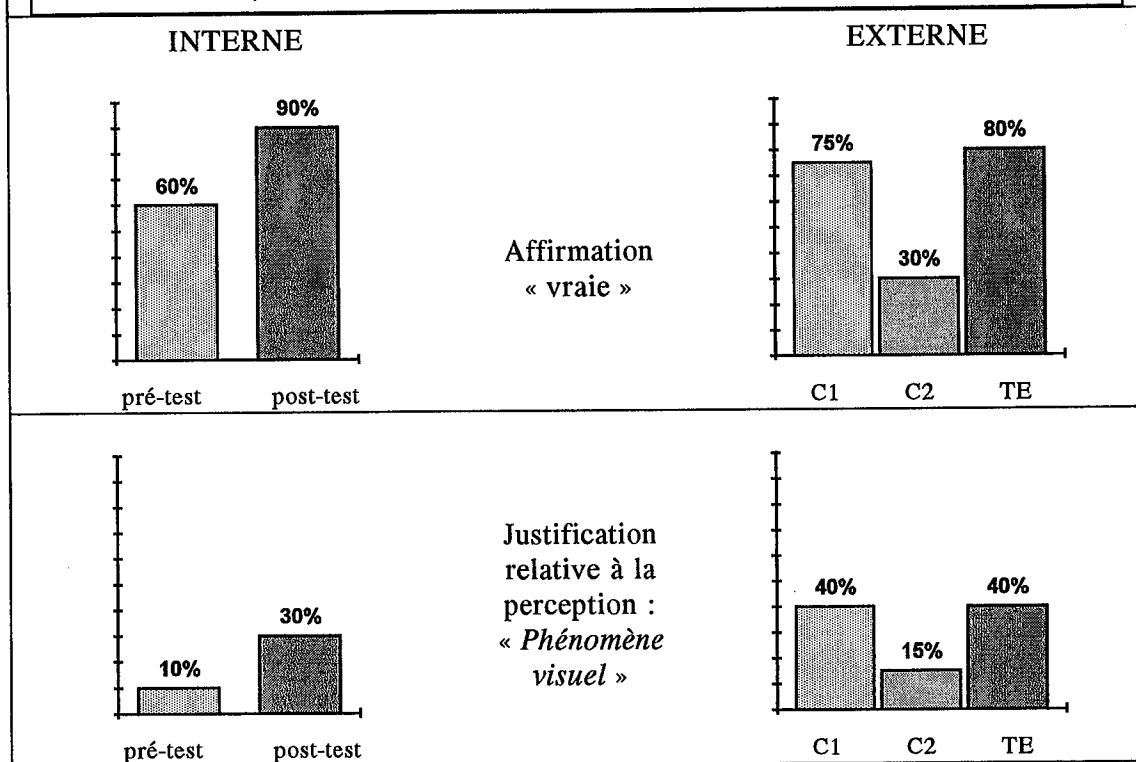


Le choix exclusif de la réponse portant sur le rôle de l'oeil est particulièrement marqué dans le groupe TE. L'idée simple qui a prévalu dans la séquence « pas de couleur sans oeil » semble solide dans le long terme.

Système visuel et contraste (détails p. 137 et 155)

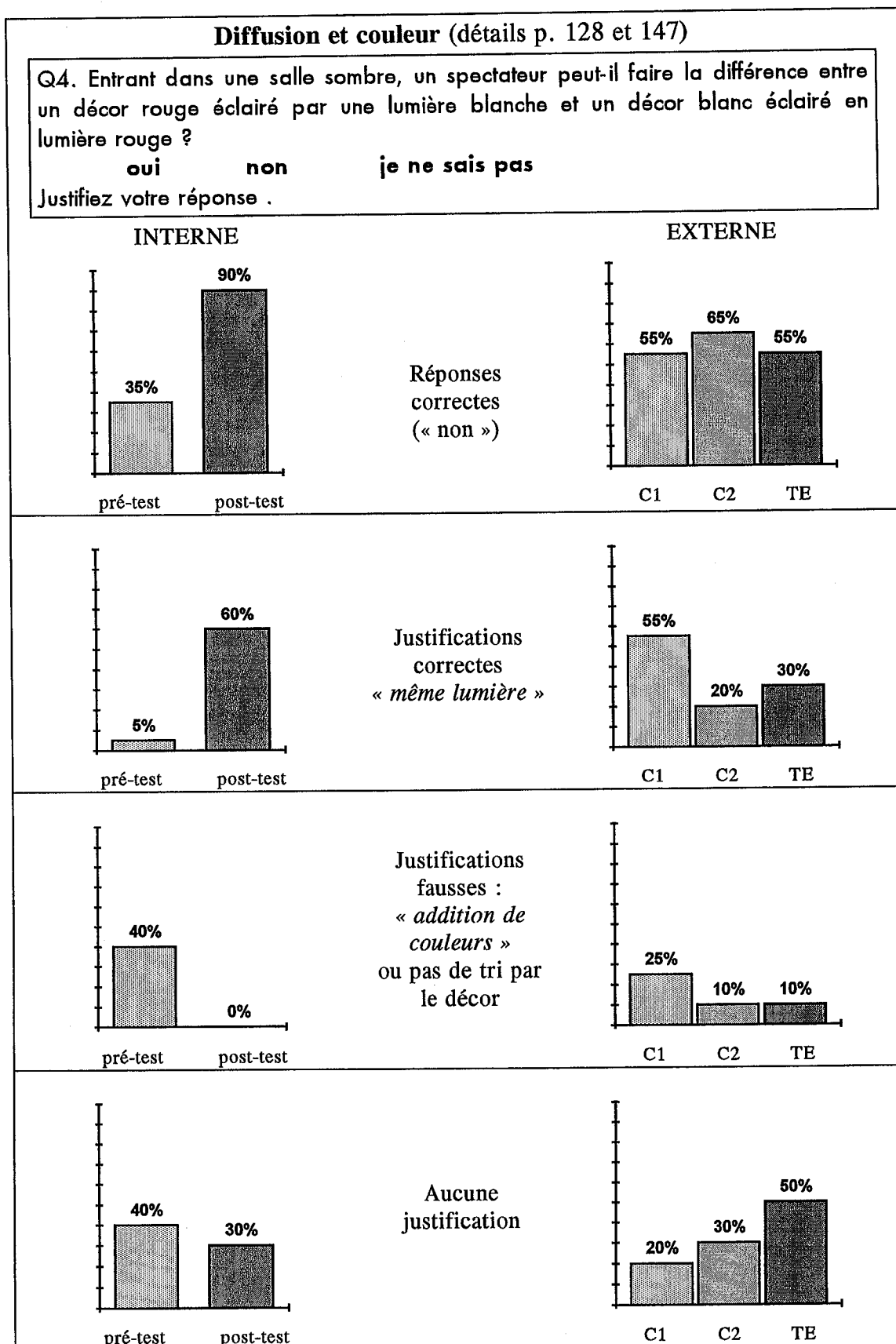
Q8. Une expérience d'ombre colorée est décrite ainsi : « à la lumière du jour on plaçait un objet devant un mur blanc, on éclairait le tout avec de la lumière rouge, l'ombre portée de l'objet sur le mur apparaissait verte » (ITTEN, *Art de la couleur*).

1. Avez-vous déjà observé le même phénomène ? **oui** **non**
 2. Cette affirmation vous paraît : **vraie** **fausse** **je ne sais pas**
- Justifiez votre réponse.



Ces questions, portant sur le système visuel, sont toutes deux très marquées par le domaine de la vision et de la perception. Ce sont pratiquement les mêmes étudiants qui considèrent comme vraie l'affirmation à la question sur le contraste simultané et qui reconnaissent le rôle de l'oeil et du système visuel en réponse à la question « où se crée la couleur ? »; d'où la quasi identité des taux correspondants dans l'évaluation externe. Là encore, les groupes C1 et TE se révèlent similaires, du point de vue de leur prise en compte de la perception, tandis qu'on note une amélioration sur ce point pour le groupe TI.

2.2. Questions plus discriminantes du point de vue d'une analyse en termes de chaîne



Le taux de réponses correctes et d'éléments de justification corrects sont plus élevés dans le post-test (90 %) que dans le pré-test (35 %) pour le groupe test TI. Dans l'évaluation externe, le groupe témoin C1 semble plus explicite dans les justifications en termes de lumière (55 % contre 20 % et 30 %) alors que, de façon surprenante, la moitié du groupe test TE ne justifie pas sa réponse.

Filtres et pigments (détails p. 131 et 149)

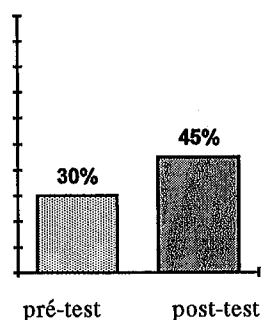
Q5. On superpose deux filtres avant l'objectif d'un projecteur de diapositives et on mélange deux pigments sur un support blanc. Le pigment 1 et le filtre 1 sont choisis de même couleur, ainsi que le filtre 2 et le pigment 2.

Observe-t-on les mêmes couleurs sur l'écran et sur la plage peinte ?

oui non ça dépend des couleurs choisies je ne sais pas

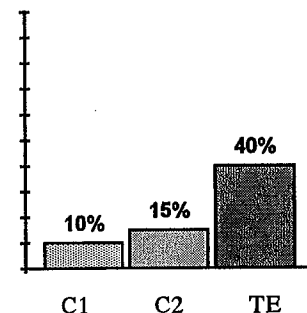
Justifiez votre réponse :

INTERNE

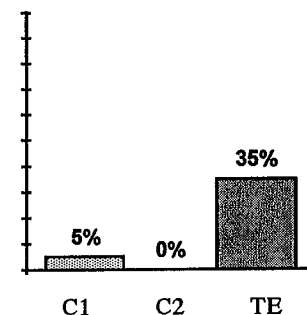
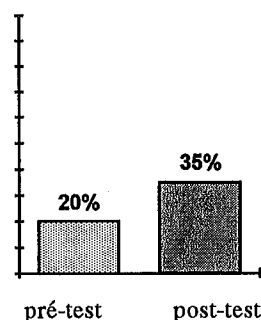


Réponses
correctes
(oui)

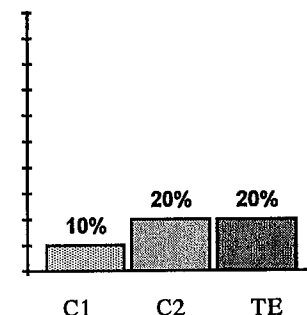
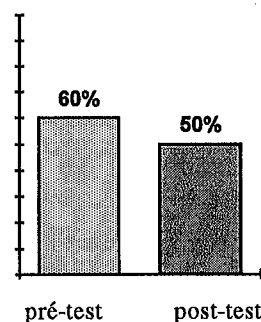
EXTERNE



Justifications
correctes :
« même lumière »



Justifications
fausses :
« superposition
de 2 filtres =
addition de 2
lumières
colorées »



Pour cette question plus technique et plus complexe, on obtient pour l'évaluation interne seulement une légère augmentation (de 30 à 45%) de réponses correctes. En même temps, la persistance d'obstacles peut être notée à travers le taux presque stable de justifications fausses (de 60 à 50%), ce qui montre la persistance de difficultés dans l'apprentissage.

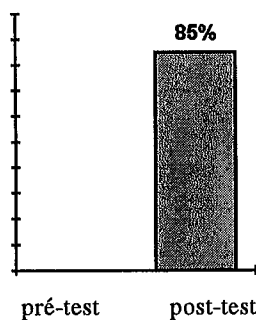
Par contre, dans l'évaluation externe, il apparaît une différence plus marquée entre le groupe test TE et les groupes témoins C1 et C2 que dans la précédente question (40% contre 15 et 10% pour la réponse brute correcte, et 35% contre 5 et 0% pour les justifications en termes de lumière). Dans cette question, où un raisonnement en termes de chaîne est nécessaire, il semble que le groupe test TE donne davantage de justifications que lorsque la question est simple.

Couleurs des corps en lumière colorée (détails p. 133 et 151)

Q6. Si on éclaire avec une source de lumière blanche un objet bicolore, il apparaît magenta (cette couleur est saturée) et blanc.

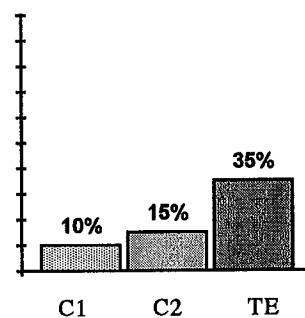
1. Si on place un filtre bleu devant cette source de lumière, de quelles couleurs apparaîtra l'objet ?

INTERNE

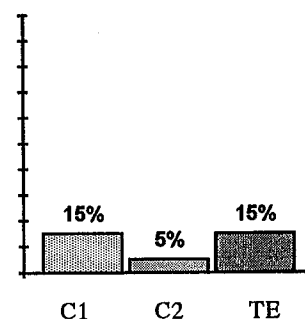
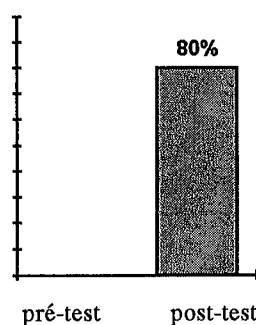


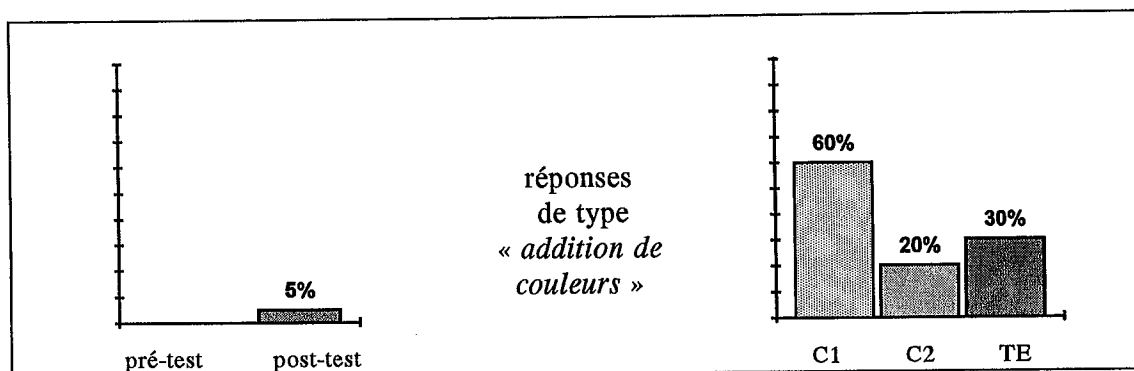
prédictions
correctes
« bleu & bleu »

EXTERNE



Eléments corrects
de justification





Cette question classique mais complexe nécessite un raisonnement utilisant tous les éléments de la chaîne pour donner une réponse correcte. Le taux de réponses brutes correctes (85 %) est élevé pour le groupe TI dans l'évaluation interne, et ces réponses brutes sont accompagnées, dans les mêmes proportions, d'éléments corrects de justification.

Dans l'évaluation externe, le taux de réponses correctes est meilleur pour le groupe test TE que pour les groupes de contrôle (35 % contre 10 et 15 %), tandis que l'absence de justification des réponses, équivalente pour les trois groupes, s'explique probablement par un manque de temps. Cependant, même si les étudiants n'explicitent pas leurs arguments, compte tenu de la complexité du problème, ils ont dû raisonner en termes de chaîne pour donner une réponse correcte.

Des réponses fausses sont compatibles avec un raisonnement par addition de « couleurs », traitées indifféremment comme s'il s'agissait de deux matières ou de deux lumières.

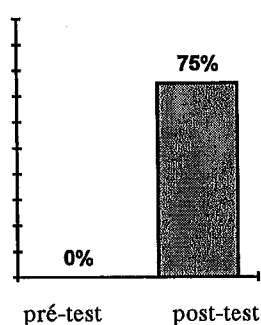
Couleurs des corps en lumière colorée (suite)

Si on éclaire avec une source de lumière blanche un objet bicolore, il apparaît magenta (cette couleur est saturée) et blanc.

6.2. Si on place un filtre vert devant cette source de lumière, de quelles couleurs apparaîtra l'objet ?

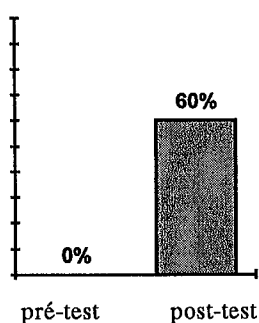
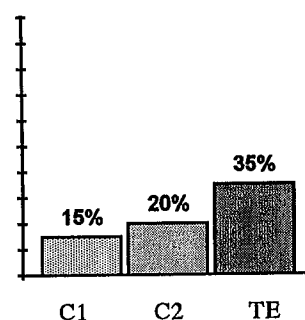
6.3. Si on éclaire l'objet simultanément avec deux sources, l'une de lumière verte et l'autre de lumière rouge, de quelles couleurs apparaîtra l'objet ?

INTERNE

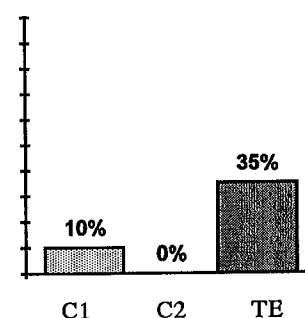


6.2. prédictions correctes : « noir (foncé) et vert »

EXTERNE



6.3. prédictions correctes : « rouge et jaune »



Lorsque la lumière est verte, on note une légère augmentation du taux de réponses correctes dans les groupes témoins C1 et C2 qui peut s'expliquer par une connaissance ritualisée des couleurs complémentaires : « une couleur absorbe sa complémentaire ».

Lorsque s'ajoute la difficulté supplémentaire de l'addition des deux lumières rouge et verte, le taux de réponses correctes du groupe test TI tombe de 75 à 60 %, alors que le taux des réponses correctes du groupe test TE reste remarquablement stable.

3. COUPLES « ASPECT DE REPONSE / QUESTION » RETENUS

3.1. « Aspect de la réponse / question »

Pour reprendre notre souci d'évaluation en termes de « profil conceptuel » de groupe, nous rassemblons des éléments d'information sur les objets suivants : un aspect de réponse pour une question donnée. Chacun de ces « couples » (aspect de la réponse / question) est qualifié de positif (*versus* négatif) lorsque l'aspect de la réponse indique, dans le cadre de la question posée, une maîtrise de l'idée de chaîne où intervient la lumière.

Comme nous l'avons fait pour caractériser les questions (voir § 1.2. chapitre 4), nous regroupons les différents couples (positifs ou négatifs) en référence à un domaine principal de compétences ou selon le niveau de maîtrise de l'idée de chaîne.

Pour établir un profil conceptuel, nous appliquons cet outil d'analyse aux groupes d'étudiants des évaluations interne et externe pour juger si un groupe montre une compréhension homogène de la couleur sur différents types de questions.

3.2. « Couples » comportant un aspect positif de réponse

Nous retenons ici les couples qui correspondent à des aspects positifs du point de vue de nos objectifs. Ce sont :

Tableau : couples « aspect positif de la réponse / question »

Aspect de la réponse	Question
1. Mention de la lumière	Arc-en-ciel
2. « Même lumière »	Laser
3. « Jaune »	Synthèse additive
4. Réponses correctes avec mention de la lumière en additif	Synthèses additive et soustractive
5. Mention de l'oeil ou du cerveau	Couleur et système visuel
6. Affirmation vraie	Contraste
7. Phénomène visuel	Contraste
8. « Même lumière »	Diffusion et couleur
9. « Même lumière »	Filtres et pigments
10. Soustraction (réponse : bleu)	Couleurs des corps 1
11. Soustraction (réponse : noir)	Couleurs des corps 2
12. Soustraction (réponse : rouge)	Couleurs des corps 3

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'ordre ci-dessus permet des regroupements.

- couples 1 et 2 : « physicien »

Ces deux premiers couples renvoient a priori à une compétence de type « physicien » : l'aspect retenu comme élément de réponse correcte se rapporte à la lumière uniquement et relève du domaine scolaire de la physique.

- couples 3 et 4 : « technicien »

Les deux suivants renvoient à des compétences de type « technicien », puisque les questions portent sur les procédés techniques de création de couleur et que les éléments de réponse retenus manifestent la connaissance de ces techniques.

- couples 5 à 7 : « perception »

Les trois suivants renvoient à une reconnaissance du rôle du système visuel dans la perception de la couleur comme réponse à de la lumière reçue.

- couples 8 à 12 : « chaîne »

Tous les couples « aspect de la réponse / question » précédents ne manifestent pas de façon évidente une compréhension complète de la chaîne. En revanche, c'est le cas de ces couples 8 à 12.

3.3. « Couples » comportant un aspect inadéquat ou faux de la réponse

Dans une deuxième catégorie d'objets, nous associons questions et éléments de réponses faux, restrictifs ou inadéquats par rapport aux objectifs d'intégration que nous nous sommes fixés. Ces objets traduisent la persistance d'obstacles pour la compréhension des phénomènes de couleur.

Ainsi la conception commune de la couleur comme matière se manifeste lorsque les étudiants prévoient le résultat d'une addition de lumières comme s'il s'agissait d'un mélange de peintures (couples 16) ou lorsqu'ils *ajoutent* la couleur du décor à celle de la lumière qui l'éclaire (couples 15 et 17). Plus largement, tous les raisonnements où la diffusion de lumière par la matière demeure implicite (couple 19) confirment l'importance de cet obstacle.

Il arrive également souvent que la conceptualisation de la lumière colorée ne soit pas assez assurée pour que l'étudiant résiste à des proximités de vocabulaire. Par exemple, la synthèse mise en oeuvre pour deux faisceaux issus de deux filtres différents est dite *soustractive* parce que les filtres opèrent par *soustraction* (couple 14) ou encore une synthèse *additive* (couple 21) est mise en oeuvre pour qualifier la lumière transmise par deux filtres *superposés* (comme si on *superposait* des lumières).

Dans le tableau suivant, les questions mentionnées le sont sous la même étiquette que dans le paragraphe précédent.

Tableau : couples « aspects négatifs de la réponse / question »

Aspect de la réponse	Question
13. compatible avec adhérence couleur-longueur d'onde	Arc-en-ciel
14. inversion procédés additif et soustractif (« <i>filtres soustractif, donc procédé soustractif</i> »)	Synthèses additive et soustractive
15. addition couleur-lumière et couleur-matière	Couleurs des corps
16. addition de lumières comme matières (« <i>marron</i> »)	Synthèse additive
17. addition couleur-lumière et couleur-matière	Diffusion et couleur
18. pas de mention de lumière (« <i>palette de couleurs</i> »)	Arc-en-ciel
19. lumière vue dans l'espace (« <i>croisement jaune</i> »)	Laser
20. pas d'oeil (« <i>décor/espace</i> »)	Couleur et système visuel
21. « <i>superposition de filtres = addition de faisceaux colorés</i> »	Filtres et pigments
22. « <i>faisceaux lumineux comme filtres</i> »	Laser

Là encore des groupements se présentent :

- couple 13 : « physicien »

Ces réponses compatibles avec l'adhérence couleur-longueur d'onde correspondent à un aspect restrictif par rapport aux objectifs de la séquence. Elles apparaissent comme un effet de l'enseignement de physique. Nous classons ce couple dans les aspects « négatifs » et de type « physicien ».

- couples 14 et 15 : « non chaîne », plutôt « non technicien »

Les éléments de réponse faux des couples suivants traduisent une méconnaissance des techniques additives et soustractives de création de couleurs, associée toutefois à une prise en compte de la lumière. Des outils, comme la composition simplifiée de la lumière blanche et les combinaisons de couleurs qui en résultent, ne sont pas maîtrisés.

- couples 16 et 17 : « non chaîne », plutôt « non physicien »

Ces réponses correspondent à la non maîtrise de tous les éléments de la chaîne, soit que la conception commune de la couleur comme matière s'y manifeste, soit que l'idée d'absorption de lumière par la matière en soit absente.

- couples 18 à 22 : « non physicien »

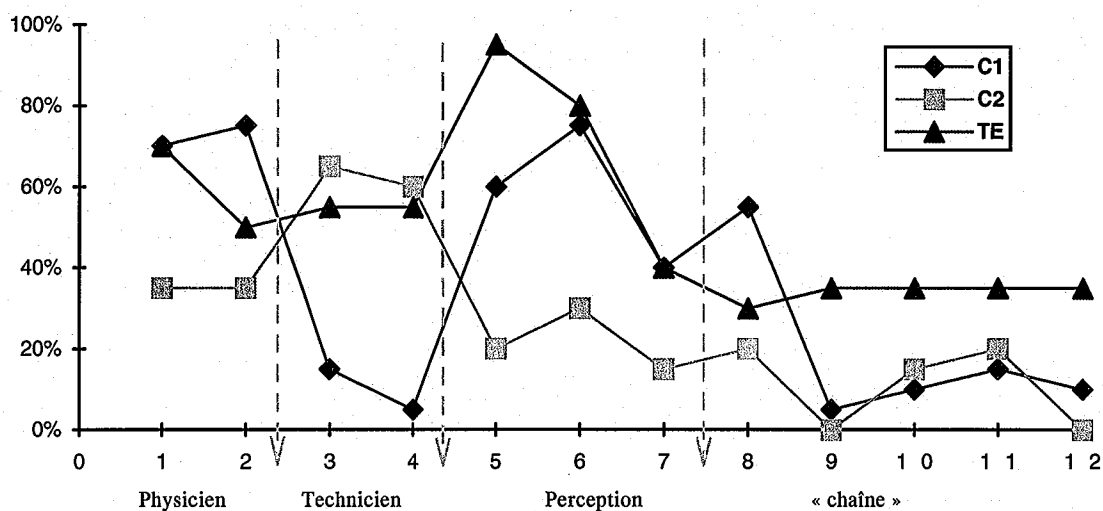
Les questions impliquant le caractère non matériel (au sens banal du terme) et invisible dans l'espace de la lumière suscitent des réponses en termes d'objets, qui matérialisent la couleur (filtres, croisement coloré, décor).

4. PROFILS CONCEPTUELS DES GROUPES

4.1. Premier type d'objets : « couples » comportant des aspects positifs

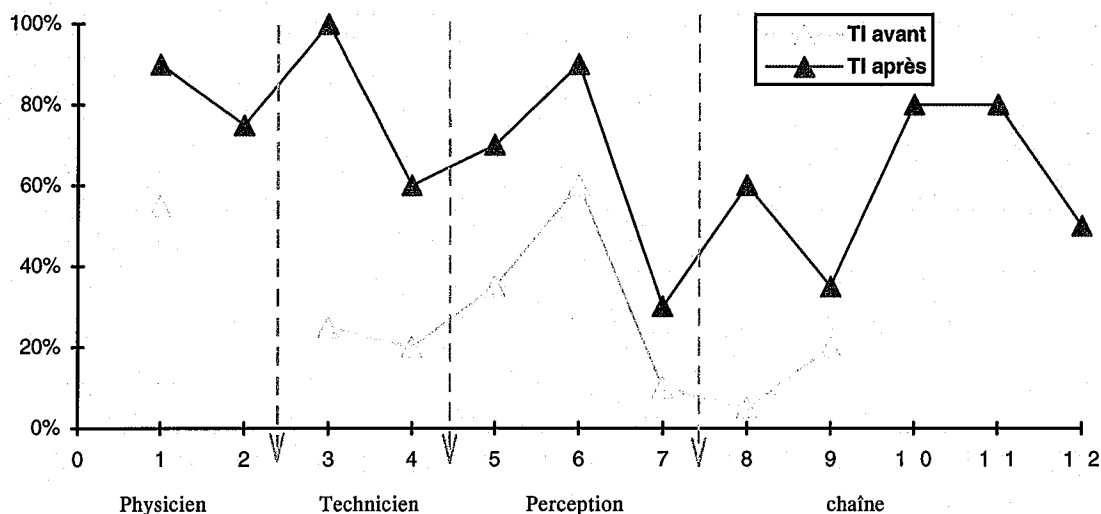
Nous indiquons dans le graphique suivant les taux d'aspects positifs de réponses obtenues dans chacun des groupes de l'évaluation externe.

Aspects de réponses correctes :
taux par type de couples et par groupe de l'évaluation externe.



De même, nous comparons, pour le groupe de l'évaluation interne, les taux « avant », lorsque nous disposons de l'information, et « après ».

Aspects de réponses correctes :
taux par type de couples et par groupe de l'évaluation interne



Pour les questions qui ont un équivalent avant et après la séquence, l'ensemble des couples *aspects positifs de la réponse / question* montre une progression à large spectre pour le groupe TI de l'évaluation interne.

A partir des couples correspondant aux questions qui ne requièrent pas une analyse en termes de chaîne, mais se réfèrent plutôt à un domaine de compétence, il apparaît que l'un des groupes témoin C1 est meilleur en ce qui concerne les questions relatives à la physique et que le second C2 est meilleur sur les questions du domaine technique. Or le groupe test TE a d'aussi bonnes réponses que le groupe le meilleur en physique et d'aussi bonnes réponses que le groupe le meilleur en technique.

Ce groupe TE montre un « profil intégré » : il semble que le choix d'un concept de couleur intégrant physique, technique et perception n'ait rien fait perdre sur chacun des domaines de compétences pris séparément, si l'on compare avec les groupes témoins.

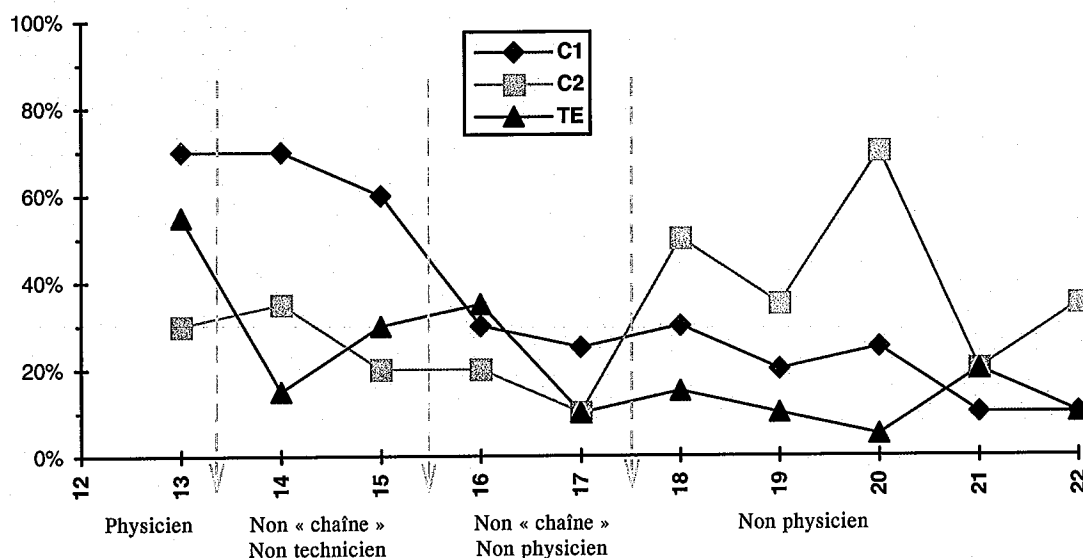
Une autre observation, que l'on peut faire à partir des éléments de réponses regroupés sous la rubrique « chaîne », est qu'un tiers du groupe test TE et plus de la moitié du groupe test TI sont sans aucun doute capables de raisonner en termes de chaîne de traitement de l'information sur la lumière pour répondre et en maîtrise la structure.

Ces acquisitions conceptuelles prennent toute leur valeur, particulièrement pour le groupe TE, par comparaison avec les deux groupes de contrôle. Il faut également bien noter qu'elles se manifestent dans le long terme (un an).

4.2. Deuxième type d'objets : obstacles et difficultés persistantes

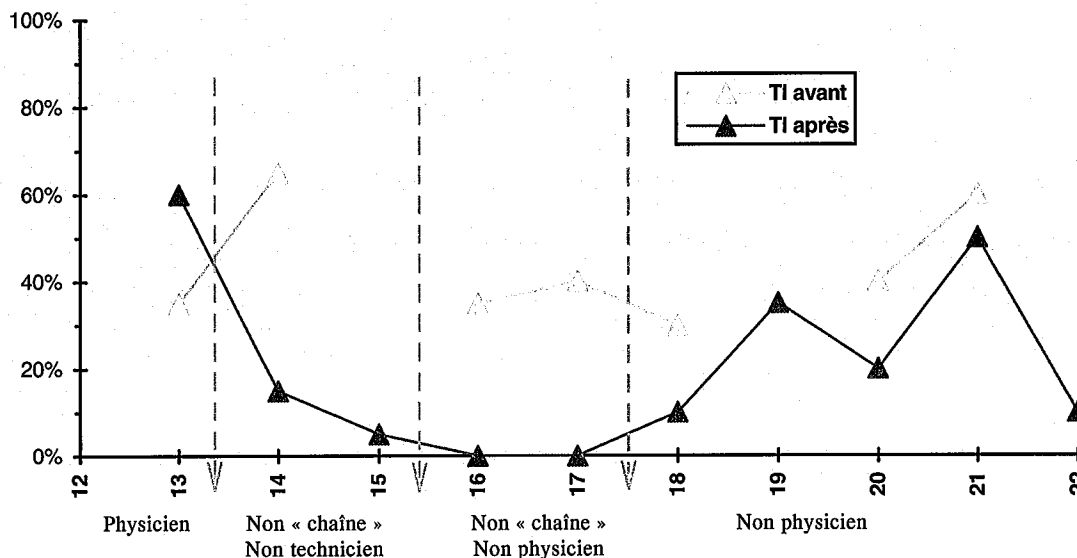
Nous indiquons dans le graphique suivant les taux d'aspects négatifs de réponses obtenues dans chacun des groupes de l'évaluation externe.

Taux d'erreurs et répartition pour les groupes de l'évaluation externe



De même, nous comparons, pour le groupe de l'évaluation interne, les taux « avant », lorsque nous disposons de l'information, et « après ».

Taux d'erreurs et répartition pour le groupe de l'évaluation interne



Le taux des réponses compatibles avec l'adhérence couleur-longueur d'onde (couple 13) augmente nettement dans l'évaluation interne après enseignement et se révèle être plus élevé dans les groupes C1 et TE qui manifestent des compétences plus grandes dans le domaine de la physique.

Les connaissances techniques acquises en cours de séquence par le groupe TI se traduisent par une baisse importante du nombre d'inversions (couple 14) des procédés additifs et soustractifs (65% à 15%), baisse confirmée dans le long terme pour le groupe TE. Le taux élevé pour le groupe C1 confirme les faibles compétences de ce groupe dans ce domaine.

Dans le même temps, on peut observer la persistance de la conception commune de la couleur comme matière et, plus largement, la fragilité de la conceptualisation de la lumière colorée manifestée par tous les groupes. Cependant, ces difficultés se retrouvent dans une proportion plus importante pour le groupe C2, confirmant ainsi de plus grandes compétences dans le domaine de la technique que dans celui de la physique.

4.3. Points marquants

De manière très cohérente, les compétences de type « physicien » se manifestent donc aussi bien à travers les aspects positifs que les aspects négatifs correspondants (couples 1 et 13). Il en va de même pour les compétences « non technicien » (couples 14 et 15) opposées à celles de « technicien » (couples 3 et 4) dont les taux varient dans le sens contraire. On peut noter, quoique de façon moins marquée, l'opposition entre « chaîne » (couples 8 à 12) et « non chaîne » (couples 14 à 17).

La même opposition apparaît entre les groupes « perception » (couples 5 à 7) et « non physicien » (couples 18 à 22) : elle suggère que reconnaître le rôle du système visuel est associé à une bonne compréhension du rôle de la lumière dans les phénomènes de couleur.

Cette cohérence se retrouve pour chaque groupe confirmée autant par les aspects positifs que négatifs : le groupe C1 manifeste un profil conceptuel à dominante « physicien », le groupe C2 un profil à dominante « technicien » et le groupe TE un profil montrant une meilleure intégration de l'ensemble des éléments de la chaîne.

C'est en prenant en compte l'ensemble des aspects (couples 1 à 22) que l'on a pu établir et confirmer le type de profil conceptuel de chacun des groupes.

Ces correspondances entre les taux de réponses associés aux aspects positifs et négatifs d'un même type de compétences cautionnent donc le choix des couples élément de réponse / question et les regroupements établis pour définir un profil conceptuel.

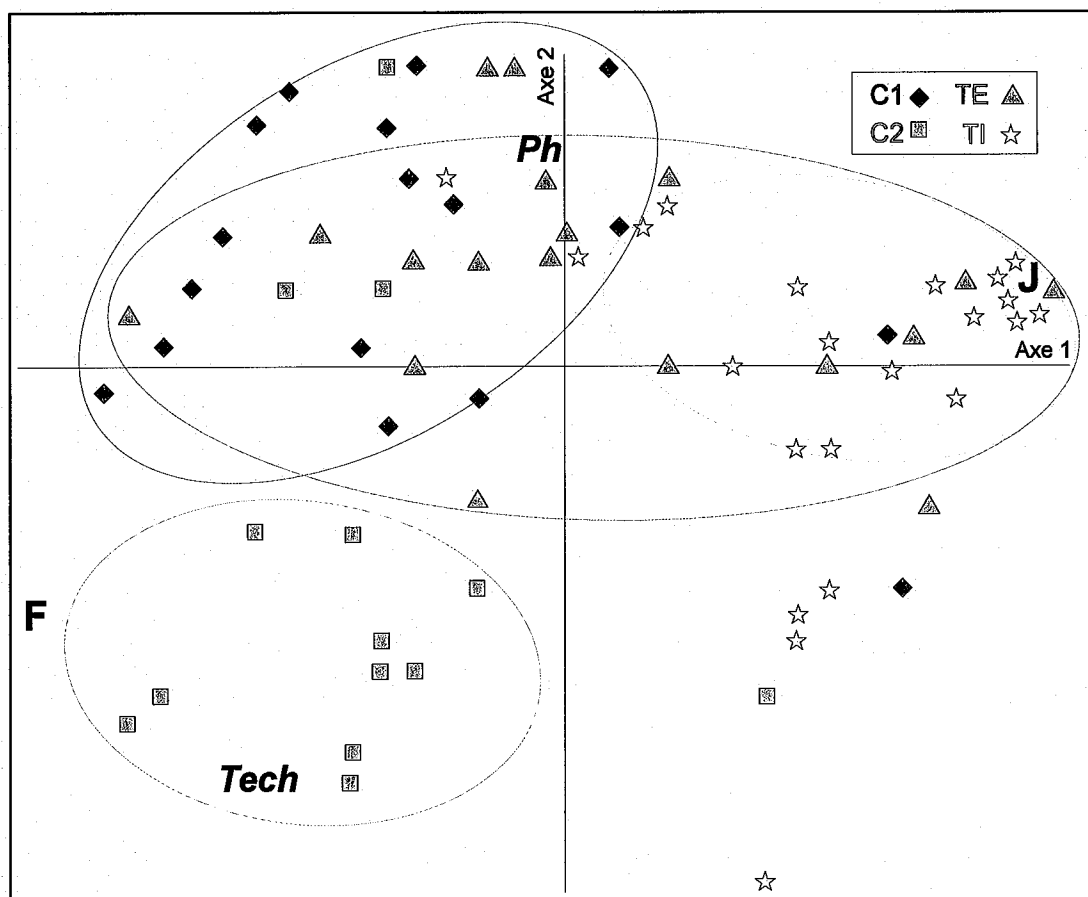
* * *

4.4. Autre méthode

On trouvera en annexe des éléments d'une analyse statistique en composantes principales faite dans le but d'explorer les différences entre groupes et de visualiser les flux de dispersion des étudiants concernés. On y observe l'existence de proximités, du point de vue des 22 couples « aspect de la réponse / question » retenus ici, entre étudiants de chaque groupe. Ceci rejoint l'idée de profil, typé d'une manière ou d'une autre, qu'expriment les courbes citées plus haut.

Chaque groupe de contrôle se retrouve autour d'une spécialité, plutôt « physique », plutôt « technique », tandis que le groupe de l'évaluation interne se retrouve autour du point fictif que donnerait un ensemble de réponses toutes justes, non marquées par une spécialité. L'année qui sépare la fin de l'enseignement de l'évaluation, pour le groupe de l'évaluation externe, se traduit par une « diffusion isotrope » des points correspondants.

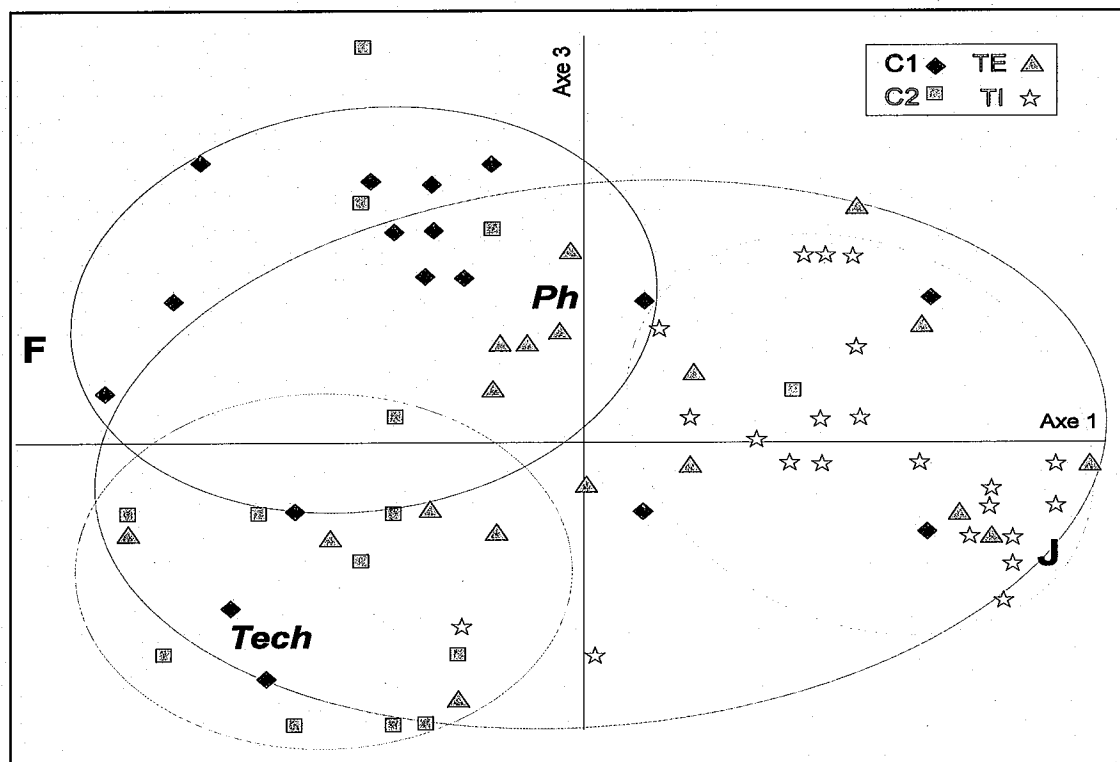
Ces éléments d'analyse statistique sont donc cohérents avec les conclusions ci-dessus.



Valeurs extrêmes

sur l'axe 1 : -4,74 ... 3,85

sur l'axe 2 : -4,35 ... 2,51



Valeurs extrêmes

sur l'axe 1 : -4,74 ... 3,85

sur l'axe 3 : -2,81 ... 3,73

CONCLUSION

Notre objectif pédagogique fixé, à savoir fournir aux étudiants d'arts appliqués un cadre conceptuel à la fois simple, cohérent et efficace dans les applications techniques des phénomènes de couleur, nous avons entrepris ce travail avec les outils qui nous ont semblé adaptés compte tenu des contraintes, en particulier temporelles, de l'enseignement scientifique dans l'enseignement technique artistique.

Nous avons pris le parti de concilier une position constructiviste et un guidage important des étudiants. Nous avons également fait le pari qu'un objectif de cohérence « au plus juste prix » se révélerait positif non seulement comme élément (fondamental) de formation de l'esprit, mais aussi comme atout pour rendre opérationnels des concepts et modes de raisonnement relatifs à la couleur, pour les difficultés techniques qui s'y rapportent.

Ces démarches se sont appuyées sur celles qui pourraient constituer l'ordinaire de la didactique lorsqu'il s'agit de construire une séquence d'enseignement : analyse épistémologique, analyse des raisonnements communs, analyse des sources scolaires habituelles du savoir en matière de couleur. Une enquête préliminaire spécifique à notre public a permis de confirmer les tendances communes de raisonnement que la littérature didactique et notre expérience d'enseignement nous laissaient attendre, d'observer l'importance de certains blocages, mais aussi d'expérimenter le caractère très mobilisateur d'une situation expérimentale inattendue (addition de lumières rouge et verte). Celle-ci a ensuite littéralement servi de socle à notre séquence, par le renvoi obligé à une interprétation de la couleur comme réponse perceptive à la lumière, seule adaptée, selon nous, à notre objectif.

La séquence s'est ensuite élaborée sur le principe tout à fait classique, mais peut-être particulièrement suivi ici, qu'à chaque étape les outils conceptuels nécessaires à l'appropriation d'un concept devaient être disponibles, et pour certains eux-mêmes construits récemment. D'abord cible puis outil, chaque élément conceptuel devait prendre un rôle dans la construction de prévisions, d'observations (car nous avons vu que les observations se construisent) et d'interprétations de phénomènes de plus en plus complexes, toujours intégrés dans un cadre unifié. A cette logique conceptuelle devait répondre, chez les étudiants, une confiance accrue dans leur propre aptitude à construire un raisonnement et finalement une disponibilité réelle des outils d'analyse pour résoudre des problèmes techniques.

Restait à savoir comment cet effort d'élaboration pouvait se traduire ensuite en termes de connaissances transférables, c'est-à-dire de recherche didactique. La menace qui pèse sur toute proposition d'enseignement susceptible, comme la nôtre, d'être effectivement mise en oeuvre en conditions et temps réels, est d'être

associée à l'idée d'innovation avec son cortège de limites : immanquablement « positive », une innovation se voit souvent soupçonnée de rencontrer un succès très attaché à la personnalité de l'innovateur. Comment aller plus loin ?

Nous avons choisi d'extraire de ce travail essentiellement deux types d'informations, dont les recherches se sont mutuellement éclairées.

L'un concerne le fonctionnement de détail de la séquence tel qu'il nous est apparu à travers les réactions des étudiants. C'est évidemment une sélection de résultats que nous donnons à ce propos. Celle-ci est inspirée par ce que nous pensions être, a priori, les épisodes les plus cruciaux de la construction conceptuelle, et d'ailleurs les faits n'ont manifestement pas démenti ce choix. L'intérêt de ces résultats est qu'ils traduisent des chemins d'apprentissage, l'existence d'obstacles, des productions d'esprits mobilisés par une situation expérimentale, tout autant que des taux de réponses correctes qu'on puisse juger satisfaisants.

C'est ce travail de suivi qui, joint à l'investigation préliminaire, a permis l'élaboration d'un outil d'évaluation des acquis conceptuels relatifs à la couleur et, par là, une caractérisation de « profils conceptuels » de groupes d'étudiants en fin d'enseignement.

A partir de là, nous avons illustré l'intérêt que présente, en soi, un tel outil en l'utilisant à la fois pour nos étudiants, par comparaison avec la situation avant enseignement (évaluation interne) et pour d'autres groupes proches par le type de public comme par les objectifs et les conditions d'enseignement, par une comparaison des acquis un an après enseignement (évaluation externe).

Avant de revenir sur les résultats de ces comparaisons, il faut souligner la nature multidimensionnelle de l'outil d'évaluation ainsi mis en oeuvre et son potentiel de caractérisation.

S'agit-il simplement d'un questionnaire comportant plusieurs questions pour contrôler plusieurs points de connaissance ? Sans doute, mais ces points ne doivent pas être compris comme relatifs à des savoirs « en soi », que les questions servent seulement à sortir de leur boîte. Ce sont des couples « aspect de réponse / question », où le fait d'avoir manifesté **telle connaissance à propos de telle question** est un élément constitutif de la description de l'acquis conceptuel. Ensuite ces couples sont classés en groupes indicateurs de type d'acquis : « physicien », « technique », « compréhension de la chaîne de transport de l'information couleur », ou en négatif, de types d'obstacles.

L'idée d'intégration, qui a présidé à la construction de la séquence, trouve ainsi un écho dans l'outil de caractérisation des acquis. Celui-ci, par l'étendue de la palette conceptuelle qu'il mobilise, permet de prévenir l'objection habituelle portant sur les évaluations d'innovations par comparaison externe, qui souligne que les questions sont souvent particulièrement ciblées sur les objectifs de la séquence expérimentale. Plus largement, il permet de caractériser le type d'acquis de tout individu, ou comme nous l'avons fait ici, dans un registre plus collectif, de tout groupe d'étudiants, que ce soit avant ou après un enseignement donné.

Les résultats que donne cet instrument de mesure pour les groupes que nous avons interrogés conduisent aux conclusions suivantes.

Nos étudiants ont notablement progressé dans la direction de nos objectifs. C'est heureux, mais c'est aussi peu surprenant et cette seule indication est peut-être insuffisamment instructive. En voici d'autres : on a pu noter que cette progression ne concerne, de manière indiscutable, complète et durable, qu'environ un tiers de nos élèves. Parallèlement, la persistance d'obstacles importants est attestée par les acquis incomplets et les progressions partielles de bon nombre d'étudiants.

La caractérisation des acquis conceptuels d'autres groupes est intéressante à un double titre. D'une part, elle confirme la pertinence de l'outil d'évaluation puisque deux groupes différents s'y révèlent chacun, de manière très cohérente, comme appartenant à un type bien net (l'un « physicien », l'autre « technique »).

D'autre part, par comparaison avec nos étudiants, elle fait apparaître que les acquis de ces derniers s'étendent sur un large spectre, et que l'ambition d'intégration de leurs connaissances dans un ensemble conceptuel cohérent a favorisé la stabilité dans le temps de ces acquis dans chacun des domaines spécifiques, notamment celui de la technique. Ce résultat n'allait pas de soi.

Au terme de ce travail, il nous semble souhaitable de poursuivre la recherche d'outils de caractérisation d'acquis conceptuels du type de celui que nous avons ébauché ici, afin d'enrichir et d'affermir le contrôle que nous exerçons sur nos expérimentations didactiques.

Toute la difficulté est sans doute de concilier les aspects multiples à prendre en compte et leur gestion. Ceci suppose d'effectuer des groupements pertinents dans les couples « aspect de réponse / question », de manière à pouvoir donner un sens à des formes particulières de profils conceptuels. Dans le cas particulier de notre étude, un tel travail n'a pu se faire sans un suivi de détail des épisodes d'apprentissage, des difficultés, des blocages, des échappatoires ou des avancées de nos étudiants.

Evaluation d'ensemble, y compris par comparaison externe, et observation fine, ont dû s'épauler mutuellement. Nous proposons l'idée que c'est une complémentarité souhaitable.

BIBLIOGRAPHIE

- ARTIGUE M. (1989), « Ingénierie didactique », in : *Actes de la V^e Ecole d'Eté de Didactique des Mathématiques*, Plestin les Grèves, Août 1989.
- ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION (AFNOR) (1989), *Couleurs - colorimétrie*, Paris, AFNOR.
- BACHELARD G. (1938), *La formation de l'esprit scientifique*, Vrin, Paris.
- BLAY M. (1985), « L'arc-en-ciel de Aristote à Newton : la genèse d'une théorie mathématique », *Revue du Palais de la Découverte*, n° 132, vol 13, Paris.
- BLAY M. (1989), « Etudes sur l'optique newtonienne », postface de *Optique* de Newton, traduit de l'anglais par J.P. Marat (1787), Christian Bourgeois Editeur, Paris.
- BOUWENS R. (1987), « Misconceptions among pupils regarding geometrical optics », in : *Proc. of the Second International Conference on Misconceptions and Educational Strategies in Sciences and Mathematics* (Cornell Univ. Ithaca, New York), vol III, p. 23-38, ed. Novak.
- BRAMAND P., DURANDEAU J.P., FAYE PH., THOMASSIER G. (1989), *Physique, Terminales C et E*, Hachette, Paris.
- BROU P., SCIASCIA T., LINDEN L., LETTVIN J. (1986), « La couleur des choses », *Pour la science*, n° 109, p. 44-51.
- BROUSSEAU G. (1986), « Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques », *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 7, 2, p.33-115.
- BRUSATIN M. (1986), *Histoire des couleurs*, Flammarion, Paris.
- BUSER P., IMBERT M. (1987), *Vision*, Hermann, Paris.
- CAILLET E., BA C. (1989), « L'art comme jubilation critique », *Les sciences hors de l'école, Aster*, n° 9, p. 43-67, INRP, Paris .
- CHAUVET F. (1990), *Lumière et vision vues par des étudiants d'arts appliqués*, Mémoire de tutorat non publié, DEA de Didactique, Université Paris 7 (LDPES).
- CHAUVET F. (1993), « Conceptions et premiers essais d'une séquence sur la couleur », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 750, p. 1-26.
- CHEVREUL M.-E. (1839), *De la loi du contraste simultané des couleurs*, Pitois-Levrault, 1839, puis diverses rééditions et traductions.
- CLOSSET J.L. (1983), *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*, Thèse Université Paris 7 (LDPES).

- COULOUBARITSIS L. ET WUNENBURGER J.J. éd. (1993), *La Couleur*, coll. Recueil, n° 4, Editions Ousia, Bruxelles.
- DELORME A. (1982), *Psychologie de la perception*, éd. Etudes vivantes, Montréal.
- DERIBERE M. (1964), *La couleur*, Que sais-je n° 220, Presses Universitaires de France, 1989, Paris.
- DUBUSC M., SOULIE A. (1983), « Couleur et colorants », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 658, p. 129-146.
- FAUCONNET S. (1984), « Etude de résolution de problèmes analogues », in *Atelier international d'été : recherche en didactique de la physique*, La Londe les Maures, CNRS, Paris.
- FAWAZ A.A., VIENNOT L. (1985), « Image optique et vision », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 686, p. 1125-1146.
- FEHER E. (1990), « Interactive museum exhibits as tools for learning : exploration with light », *International Journal of Science Education*, vol 12, n° 1, p. 35-49.
- FEHER E., RICE K. (1987), « A comparison of teacher-students conceptions in optics », in *Proceedings of the Second International Conference on Misconceptions and Educational Strategies in Sciences and Mathematics* (Cornell Univ. Ithaca, New York), vol II, p. 108-116, ed. Novak.
- FEYNMAN R. (1987), *Lumière et matière : une étrange histoire*, Interéditions, Paris.
- FEYNMAN R. (1970), *La Mécanique*, tome 1, Interéditions, Paris.
- FILLACIER J. (1987), *La pratique des couleurs*, Dunod, Paris.
- FLEURY P., MATHIEU J.-P. (1965), *Lumière*, Eyrolles, Paris.
- FONTAINE G., PAUL J.C., TOMASINO A., (1989), *Physique, Terminales C et E*, Nathan, Paris.
- GERRITZEN F. (1975), *Présence de la couleur*, Dessain-Tolra, Paris.
- GHIGLIONE R., MATALON B. (1978), *les enquêtes sociologiques, théories et pratique*, Armand Colin, Paris.
- GOETHE W. (1810), *Le traité des couleurs*, Triades, Paris, 1973.
- GUESNE E. (1976), « Lumière et vision des objets, un exemple de représentation des phénomènes physiques préexistant à l'enseignement », in *Proc. of GIREP*, G. Delacôte (Ed.), Taylor and Francis, London.
- GUESNE E., BARBOUX M. (1977), *Module photographique*, LIRESPT, Université Paris 7.
- GUESNE E., TIBERGHIEU A., DELACOTE G. (1978), « Méthodes et résultats concernant l'analyse des conceptions des élèves dans différents domaines

- de la physique : chaleur et lumière », *Revue Française de Pédagogie*, n° 45, p. 25-32.
- GUESNE E. (1984), « Children's ideas about light : les conceptions des enfants sur la lumière », *New Trends in Physics Teaching*, vol. IV, p. 179-192, UNESCO, Paris.
- HELMHOLTZ H. (1867), *Optique physiologique*, traduite par Javal et Klein, Masson, Paris, réimpression Ed. Jacques Gabay, 1989.
- ITTEN J. (1967), *L'art de la couleur*, Dessain-Tolra, Paris.
- JOHSUA S., DUPIN J.J. (1993), *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, PUF, Paris.
- JOUANISSON R. (1985), « Une expérience pluridisciplinaire : polyèdres et synthèse additive des couleurs », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 676, p. 1351-1360.
- JUNG W. (1987), « Understanding Students' Understandings : the Case of Elementary Optics », in *Proc. of the Second International Conference on Misconceptions and Educational Strategies in Sciences and Mathematics* (Cornell Univ. Ithaca, New York), vol III, p. 268-277, ed. Novak.
- KAMINSKI W. (1989), « Conceptions des enfants (et des autres) sur la lumière », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, p. 973-996.
- KAMINSKI W. (1991), *Optique élémentaire en classe de quatrième : raisons et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement*, Thèse Université Paris 7 (LDPES).
- KOWALISKI P. (1972), *Théorie photographique appliquée*, Masson, Paris.
- KOWALISKI P. (1978), *Vision et mesure de la couleur*, Masson, Paris.
- KUPPERS H. (1975), *La couleur. Origine, méthodologie, applications*, Dessain-Tolra, Paris.
- LAND E. H. (1978), « La théorie rétinex de la vision des couleurs », *Pour la science*, n° 4, p. 74-92.
- LA ROSA C., MAYER M., PATRIZI P., VICENTINI-MISSONI M. (1984), « Commonsense knowledge in optics : Preliminary results of an investigation into the properties of light », *European Journal of Science Education*, vol. 6, n° 4, p. 387-397.
- LE GRAND Y. (1968), « Lumière et couleurs », in *L'optique physiologique*, tome II, Ed. Revue Optique, Paris.
- LEFEVRE R. (1988), *Contribution à l'étude des conceptions des étudiants de l'université sur le thème de l'optique*, Thèse Université Paris 7.
- LENA P., BLANCHARD A. (1990), *Lumières : une introduction aux phénomènes optiques*, InterEditions, Paris.

- LINDSAY P.H., NORMAN D.A. (1980), *Traitement de l'information et comportement humain, une introduction à la psychologie*, Vigot, Montréal.
- LIVINGSTONE M. (1988), « Art, illusion et système visuel », *Pour la Science*, n° 125, p. 44-53.
- MAITTE B. (1981), *La lumière*, Coll. Point Sciences, Seuil, Paris.
- MARTINAND J.L. (1986), *Connaître et transformer la matière, des objectifs pour l'initiation aux sciences et techniques*, Peter Lang, Berne.
- MARTINAND J.L. (1988), « Quelques apports des recherches en didactique à l'enseignement des sciences physiques », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 706, p. 891-913.
- MAURINES L. (1986), *Mécanique spontanée du signal*, Thèse Université Paris 7 (LD PES).
- MARX E. (1983), *Couleur optique*, Dessain-Tolra, Paris.
- MORTIMER E. (1993), « The evolution of students' explanations for physical state of matter as a change in their conceptual profile », in *Proc. of the IVth International Conference on Misconceptions and Educational Strategies in Sciences and Mathematics* (Cornell Univ. Ithaca, New York).
- NATHANS J. (1989), « Les gènes de la vision des couleurs », *Pour la Science*, n° 138, p. 32-40.
- NASSAU K. (1980), « L'origine de la couleur », *Pour la Science*, n° 38, p. 66-81.
- NEWTON I. (1704), *Traité d'optique*, (*Optics*, 1704), trad. P. Coste, Paris 1722, fac-similé publié par Gauthier-Villars, Paris 1955.
- OLIVIERI G., TOROSANTUCCI G., VICENTINI M. (1988), « Coloured shadows », *International Journal of Science of Education*, vol. 10, n° 5, p. 561-569.
- OSBORNE J. F., BLACK P. (1993) « Young children's (7-11) ideas about light and their development », *International Journal of Science Education*, vol 15, n° 1, p. 83-93.
- PERALES F. J. (1989) « Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables », *International Journal of Science of Education*, vol. 11, n° 3, p. 273-286.
- PIAGET J., INHELDER B., (1941), *Le développement des quantités physiques chez l'enfant*, Delachaux-Niestlé, Neufchatel.
- PIAGET J. et al. (1974), *Réussir et comprendre*, PUF, Paris.
- POSTIC M., DE KETELE J.M., *Observer les situations éducatives*, PUF, Paris.
- PRAT C. (1989), « Conception des élèves de collège sur la lumière et les phénomènes de couleur », *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 710, p. 97-113.

- ROBARDET G., GUILLAUD J.C. (1993), *Eléments d'épistémologie et de didactique des sciences physiques*, Publications de l'I.U.F.M., Grenoble.
- ROMER G., DELAMOIR J. (1990), « Les premières photographies en couleur », *Pour la Science*, n° 148, p. 72-81.
- RONCHI V. (1956), *Histoire de la lumière*, Libr. A. Colin, Paris.
- ROZIER S. (1988), *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*, Thèse Université Paris 7 (LDPES).
- SAILLARD M. (1988), *Histoire de la spectroscopie : de la théorie de la lumière et des couleurs de I. Newton (1672) à la découverte de l'effet Zeeman (1897)*, Cahiers d'histoire et de philosophie des Sciences n° 26, Ed. Société française d'histoire des sciences et des techniques, Paris.
- SALTIEL E. (1978), *Concepts cinématiques et raisonnements naturels : étude de la compréhension des changements de référentiels galiléens par les étudiants en sciences*, Thèse Université Paris 7.
- SAXENA A. B. (1991), « The understanding of the properties of light by students in India », *International Journal of Science of Education*, vol. 13, n° 3, p. 283-289.
- SHERMAN P.D. (1981), *Colour Vision in the Nineteenth Century*, Adam Hilger Ltd, Bristol.
- TIBERGHIEU A. (1983), « Revue critique sur les recherches visant à élucider le sens de la notion de lumière chez les élèves de 10 à 16 ans. » in *Recherche en didactique de la physique : les actes du premier atelier international d'été, La Londe les Maures*, p. 125-136, CNRS, Paris.
- VARELA F., THOMPSON E. (1991), « La vision des couleurs : une étude de cas aux fondements de la science cognitive » in *Le cerveau pluriel* sous la direction de Thill G., Feltz B., Lambert D., p.15-26, Ed. Ciaco, col. Catalyses, Bruxelles.
- VIENNOT L. (1977), *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Hermann, Paris.
- VIENNOT L. (1993), « Fundamental patterns in common reasoning : examples in Physics », in : P.L. Lijnse ed., *European Research in Science Education : Proceedings of the first PhD Summer School*, CDβ Utrecht.
- VOLLEBREGT M.J. (1993), « In search of a 'didactical structure' for the introduction of particles », in : P.L. Lijnse ed., *European Research in Science Education : Proceedings of the first PhD Summer School*, CDβ Utrecht.
- WILLIAMSON S.J., CUMMINS H. Z., (1983), *Light and color in nature and art*, John Wiley & Sons, New York.

- ZANA B. (1986), « La couleur utilisée comme moyen dans la construction de concepts scientifiques et technologiques. », *Feuille d'épistémologie appliquée et de didactique des sciences*, n° 8, p. 85-91.
- ZEKI S. (1990), « La construction des images par le cerveau », *La Recherche*, n° 222, p. 712-721.

ANNEXE I

1. Questionnaire St Rémy	1
2. Questionnaire avant enseignement	5
3. Questionnaire d'évaluation finale	8

Questionnaire

1/4

NOM, Prénom :
 classe :

1. Précisez la nature et la durée de votre formation en Arts Plastiques :

- lycée (précisez le diplôme final, série ou option) :

- extra-scolaire :

- post-bac :

Dans les questions suivantes, n'hésitez pas à détailler vos réponses, à donner des exemples précis. Entourez la bonne réponse (ou barrez la mention inutile).

2. Avez-vous reçu des informations sur la couleur au cours de vos études ? **oui non**

3. Précisez le cadre disciplinaire :

Arts plastiques **oui non**

Techniques de reproduction **oui non**

(photo, vidéo, impression)

Psychologie **oui non**

Physique-Chimie..... **oui non**

Biologie **oui non**

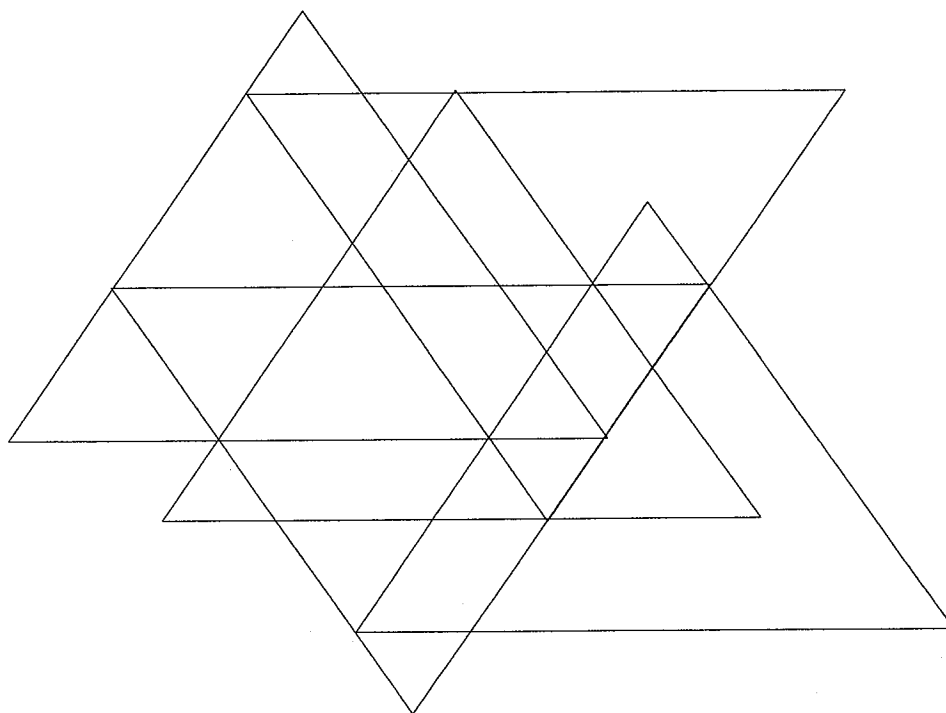
Philosophie **oui non**

Autres, lesquels

.....

2/4

4. Caractérisez le plus précisément possible les différentes couleurs observées sur le document couleur joint (NE PAS ECRIRE SUR CE DOCUMENT COULEUR). Numérotez les plages et indiquez la couleur correspondante sur le schéma ci-dessous.



3/4

5.1. Le document couleur joint est une photocopie couleur d'un montage superposant des triangles identiques (même forme, même taille), transparents et de différentes couleurs.

Donnez le nombre de triangles utilisés ainsi que leurs couleurs.

[illegible]

5.2 Pourriez-vous citer des domaines d'application où des couleurs sont obtenues par superposition de matières ?

[illegible]

6. Connaissez-vous d'autres procédés de création de couleurs qui ne fassent pas appel à une superposition de matières ? Donnez des exemples.

[illegible]

4/4

7. Toutes les couleurs sont-elles dans l'arc-en-ciel ? **oui** **non**

Justifiez votre réponse.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

8.1. Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte. Qu'observe-t-on, là où les faisceaux se superposent ?

(cochez la ou les réponses qui vous semblent justes)

- du blanc..... ☐
- du marron..... ☐
- du jaune..... ☐
- du rouge et du vert..... ☐
- je ne sais pas..... ☐

8.2. Où se crée cette couleur ?

- dans l'espace où les faisceaux se rencontrent..... ☐
- sur le décor..... ☐
- dans l'oeil de l'observateur (sur la rétine)..... ☐
- dans le cerveau de l'observateur..... ☐

Commentaire et/ou schéma :

9. On dit : « la nuit, tous les chats sont gris ».

Cette affirmation vous paraît-elle **vraie** **fausse** ?

Expliquez votre jugement.

.....

.....

.....

.....

.....

Questionnaire

1/3

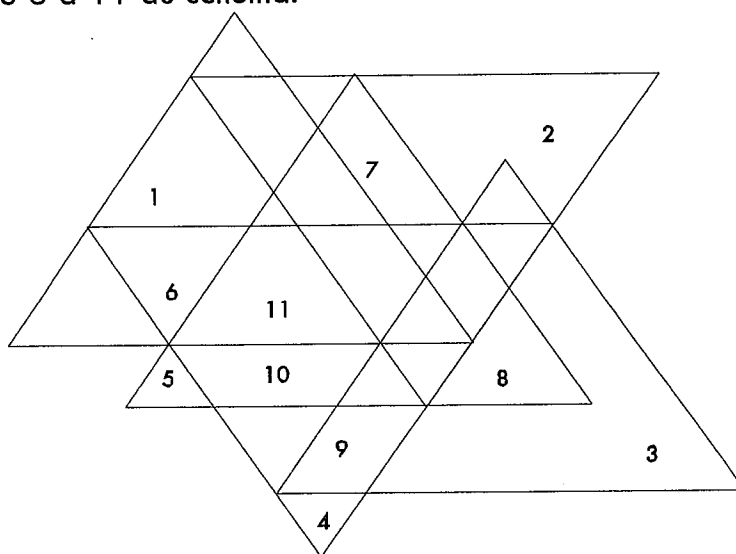
NOM, Prénom :

classe :

1. On réalise un montage en superposant cinq triangles identiques (même forme, même taille), transparents et de différentes couleurs. On le pose sur une table lumineuse (verre dépoli diffusant une lumière blanche).

1.1. Caractérisez le plus précisément possible les différentes couleurs observées sur les zones numérotées de 6 à 11 du schéma.

- 1 : vert
 2 : rose
 3 : jaune
 4 : rouge
 5 : bleu (turquoise)
 6 :
 7 :
 8 :
 9 :
 10 :
 11 :



1.2. Obtiendrait-on les mêmes couleurs sur les zones 6 à 11 si on mélangeait des pigments ?

oui

non

je ne sais pas

Justifiez votre réponse.

.....

.....

.....

.....

.....

2. Pourriez-vous citer des domaines d'application où des couleurs sont obtenues par superposition de matières ?

.....

.....

.....

.....

.....

2/3

3. Connaissez-vous d'autres procédés de création de couleurs qui ne fassent pas appel à une superposition de matières ? Donnez des exemples.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

4. Toutes les couleurs sont-elles dans l'arc-en-ciel ? **oui non**
Justifiez votre réponse.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

5. Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte.

5.1. Qu'observe-t-on, là où les faisceaux se superposent ?
(cochez la ou les réponses qui vous semblent justes)

du blanc..... <input type="checkbox"/>	du rouge et du vert <input type="checkbox"/>
du marron..... <input type="checkbox"/>	autre <input type="checkbox"/>
du jaune <input type="checkbox"/>	je ne sais pas..... <input type="checkbox"/>

5.2. Où se crée cette couleur ?

dans l'espace où les faisceaux se rencontrent ☐

sur le décor..... ☐

dans l'oeil de l'observateur (sur la rétine)..... ☐

dans le cerveau de l'observateur..... ☐

Commentaire et/ou schéma :

3/3

6. Entrant dans une salle sombre, un spectateur peut-il faire la différence entre un décor rouge éclairé par une lumière blanche et un décor blanc éclairé en lumière rouge ?

.....

.....

.....

.....

.....

7. On dit : « la nuit, tous les chats sont gris ».

Cette affirmation vous paraît-elle **vraie** **fausse** ?

Expliquez votre jugement.

.....

.....

.....

.....

.....

8. Une expérience d'ombre colorée est décrite ainsi : « à la lumière du jour on plaçait un objet devant un mur blanc, on éclairait le tout avec de la lumière rouge, l'ombre portée de l'objet sur le mur apparaissait verte. » (*Art de la couleur*, ITTEN)

8.1. Avez-vous déjà observé un tel phénomène ? **oui** **non**

8.2. Cette affirmation vous paraît-elle **vraie** **fausse**

Justifiez votre réponse.

[illegible]

Questionnaire

1/4

NOM, Prénom :

classe :

Entourez les réponses qui vous semblent justes.

1. Voit-on toutes les couleurs dans l'arc-en-ciel ?

oui non je ne sais pas

Justifiez votre réponse.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte.

2.1. Qu'observe-t-on, là où les faisceaux se superposent ?

- | | | | |
|-----------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| du blanc | <input type="checkbox"/> | du rouge et du vert | <input type="checkbox"/> |
| du marron | <input type="checkbox"/> | je ne sais pas | <input type="checkbox"/> |
| du jaune | <input type="checkbox"/> | autre | <input type="checkbox"/> |

2.2. Où se crée cette couleur ?

- | | |
|---|--------------------------|
| dans l'espace où les faisceaux se rencontrent | <input type="checkbox"/> |
| sur le décor | <input type="checkbox"/> |
| dans l'oeil de l'observateur (sur la rétine) | <input type="checkbox"/> |
| dans le cerveau de l'observateur | <input type="checkbox"/> |

Commentaire et/ou schéma :

2/4

3. Deux faisceaux laser, l'un rouge et l'autre vert, se croisent dans l'espace dans une zone Z. La couleur* de chaque faisceau est-elle la même avant et après avoir traversé la zone de croisement ?

* On emploie ici le terme couleur d'un faisceau pour désigner celle qu'on voit si on place un écran blanc coupant le faisceau.

oui**non****je ne sais pas**

Justifiez votre réponse :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

4. Entrant dans une salle sombre, un spectateur peut-il faire la différence entre un décor rouge éclairé par une lumière blanche et un décor blanc éclairé en lumière rouge ?

oui**non****je ne sais pas**

Justifiez votre réponse :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

5. On superpose deux filtres avant l'objectif d'un projecteur de diapositive et on mélange deux pigments sur un support blanc. Le pigment 1 et le filtre 1 sont choisis de même couleur, ainsi que le filtre 2 et le pigment 2.

Observe-t-on les mêmes couleurs sur l'écran et sur la plage peinte ?

oui non ça dépend des couleurs choisies je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

.....

.....

.....

.....

3/4

6. Si on éclaire avec une source de lumière blanche un objet bicolore, il paraît magenta (cette couleur est saturée) et blanc.

6.1. Si on place un filtre bleu devant cette source de lumière, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

6.2. Si on place un filtre vert devant cette source de lumière, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

6.3. Si on éclaire l'objet simultanément avec deux sources, l'une de lumière verte et l'autre de lumière rouge, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

4/4

7. Il existe deux procédés de synthèse des couleurs, l'un est souvent qualifié de « mélange additif » et l'autre de « mélange soustractif ». Expliquez la différence entre les deux. Précisez les conditions d'observation en vous aidant éventuellement de schémas.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

8. Une expérience d'ombre colorée est décrite ainsi : « à la lumière du jour on plaçait un objet devant un mur blanc, on éclairait le tout avec de la lumière rouge, l'ombre portée de l'objet sur le mur apparaissait verte » (ITTEN, *Art de la couleur*).

8.1. Avez-vous déjà observé le même phénomène ? **oui non**

8.2. Cette affirmation vous paraît : **vraie fausse je ne sais pas**

Justifiez votre réponse.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

9. Si vous avez mieux compris les phénomènes de couleur au cours de vos enseignements précédents, quel point vous a le plus marqué? (ou quels points?)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

ANNEXE II

SEQUENCE D'ENSEIGNEMENT : COMPLEMENTS

1. Rappels de photométrie	1
2. Lexique des termes courants et techniques	4
3. Notes techniques	6
4. Article de vulgarisation	7

1. RAPPELS DE PHOTOMETRIE DES LUMIERES COLOREES

La gamme des longueurs d'onde des radiations électromagnétiques auxquelles l'oeil humain est sensible constitue "la lumière". Cette gamme correspond au maximum de la distribution spectrale d'énergie de la source de lumière habituelle qu'est le soleil.

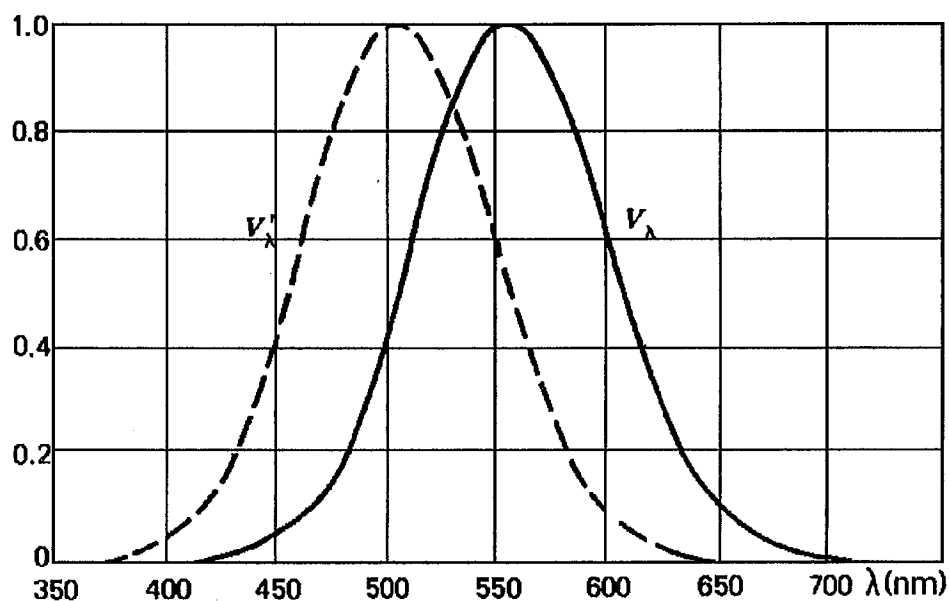
Ainsi la « quantité de lumière » venant d'une source dépend de la distribution énergétique spectrale de la source et de la sensibilité spectrale de l'oeil humain.

1.1. Courbes de sensibilité spectrale

Différentes méthodes de comparaison (l'oeil est un instrument de « zéro ») ont permis d'établir les valeurs numériques de la courbe de sensibilité de l'oeil humain.

Les deux courbes ci-dessous V_λ et V'_λ sont les fonctions spectrales des visions photopiques et scotopiques de l'observateur standard de la CIE¹. Elles indiquent les valeurs de l'efficacité lumineuse relative pour chaque longueur d'onde et constituent une norme définissant l'oeil humain.

La courbe en traits pleins correspond à la vision de jour, celle en tirets à la vision de nuit.



1. Commission internationale de l'éclairage

1.2. Grandeurs énergétiques et lumineuses

Tableau de correspondance

Grandeurs énergétiques		Grandeurs lumineuses	
Nom Unité	Symbole	Nom Unité	Symbole
Flux énergétique watt (W)	Φ_e	Flux lumineux lumen (lm)	Φ_v
Intensité énergétique watt/stéradian (W/sr)	I_e	Intensité lumineuse candela (lm/sr ou cd)	I_v
Luminance énergétique watt/stéradian.m ² (W/sr.m ²)	L_e	Luminance lumineuse candela/m ² (lm/sr.m ² ou cd/m ²)	L_v
Eclairement énergétique watt/m ²	E_e	Eclairement lumineux lumen/m ² ou lux (lm/m ² ou lux)	E_v

Les grandeurs énergétiques sont notées avec le symbole e et les grandeurs lumineuses avec le symbole v (visuel)

Depuis 1979, on a établi une nouvelle définition du lumen, basée sur celle du candéla :

« le lumen est le flux lumineux d'une radiation monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ Hz dont le flux énergétique est $1/683$ W. »

Le flux lumineux pour chaque longueur d'onde est donc lié au flux énergétique et à l'efficacité lumineuse par la relation :

$$\text{flux lumineux} = (\text{efficacité lumineuse spectrale}) \times (\text{flux énergétique})$$

soit en vision de jour

$$\Phi_v = 683 V_\lambda \Phi_e$$

et, en vision de nuit,

$$\Phi_v = 1700 V'_\lambda \Phi_e$$

1.3 Tableau récapitulatif des termes utilisés pour caractériser les couleurs

(Extraits de *Couleurs - colorimétrie*, AFNOR, Paris, 1989.)

CORRESPONDANCE ENTRE LES DIFFÉRENTS VOCABLES SELON LES CONDITIONS D'EMPLOI				
	Termes photométriques et colorimétriques (1)	Termes d'usage courant		Termes utilisés par les psychophysicologues
Source)	Luminance lumineuse	intense	Luminosité	
		faible		
(Objet)	Facteur de luminance lumineuse	clair	Clarté	
		foncé		
Chromaticité	Longueur d'onde dominante ou complémentaire	vert bleu violet jaune orange rouge pourpre	vif pâle profond rabbattu	Teinte
	pureté colorimétrique	pur (saturé) lavé de blanc (lavé)	Pureté	Saturation
(1) Adoptés par la C.I.E.				

2. LEXIQUE DES TERMES D'USAGE COURANT ET TECHNIQUE

Additif (Mélange ... des couleurs). Mélange de couleurs (de lumières colorées²) dont la résultante est plus lumineuse que chacune des couleurs de base utilisées. Synonyme: Synthèse additive des couleurs. En anglais: *Additive colour mixture ou Additive colour stimulus synthesis*.

Clarté. L'une des trois dimensions de la couleur de surface allant du noir au blanc. Elle occupe l'axe vertical dans le solide des couleurs.

Constance (perceptive). Maintien des caractéristiques objectives, en dépit de variations de l'information reçue par le système visuel.

Constance de la couleur. Maintien de la tonalité, en dépit de variations de la composition spectrale de l'éclairage.

Constance de la luminosité. Maintien de la luminosité, en dépit de variations de l'intensité d'éclairage.

Contraste simultané. Renforcement subjectif des différences de couleur (contraste chromatique) ou de luminosité. Le contraste chromatique est caractérisé par un renforcement des complémentaires.

Contraste successif. Voir Image consécutive.

Dyschromatopsie. Nom générique utilisé pour décrire les troubles de la vision des couleurs (le daltonisme en est une forme).

Égalisation (des couleurs). Atténuation subjective des différences de couleurs ou de luminosité de stimuli contigus. Lorsque les surfaces concernées sont relativement petites, le contraste simultané fait place à un effet d'égalisation. Synonyme: Effet d'assimilation. En anglais: *Spreading effects*.

Image consécutive. Sensation visuelle qui persiste après l'arrêt de la stimulation. On peut l'observer par différents moyens. L'un des procédés consiste à fixer du regard une forme colorée (stimulus d'inspection) et à regarder ensuite une surface achromatique (stimulus-test). On obtient alors une image complémentaire, c'est-à-dire dont la tonalité est approximativement complémentaire de celle du stimulus d'inspection. L'image consécutive complémentaire n'est que l'un des types d'image consécutive que l'on peut obtenir. L'image consécutive s'explique habituellement par une adaptation ou une fatigue sélective d'éléments rétinien.

Inhibition latérale. Processus par lequel l'excitation de cellules nerveuses entraîne la diminution d'activité des cellules voisines.

Luminance³. Grandeur photométrique correspondant à la grandeur énergétique appelée luminance énergétique. Sa définition tient compte du fait que le récepteur visuel est inégalement sensible aux rayonnements du spectre. Par définition, c'est une grandeur additive.

2. C'est nous qui précisons pour plus de clarté.

3. Extrait de KOWALISKI P. (1978), *Vision et mesure de la couleur*, Masson, Paris, p. 228.

Luminosité⁴. Attribut de la sensation visuelle qui permet à un observateur de juger directement d'une différence de sensation lumineuse. La luminosité n'est pas une grandeur additive.

Mémoire (Couleur de). Couleur attachée à un objet familier par l'expérience antérieure et susceptible d'affecter la perception de la couleur d'un objet. En anglais : *Memory colour*.

Perception et sensation. La distinction entre sensation et perception peut prendre plusieurs sens. La perception est conçue comme un composé complexe formé de sensations plus élémentaires. La perception peut représenter l'apport d'une signification aux données de la sensation.... Les auteurs contemporains ont tendance à rejeter la distinction entre sensation et perception parce que la sensation pure n'a pas de réalité psychologique.

Processus antagonistes ou opposés (Théorie des). Théorie de la vision des couleurs formulée d'abord par Hering, puis reprise par plusieurs auteurs, notamment Hurvich et Jameson. Suivant cette théorie, la perception des couleurs dépendrait de trois systèmes fonctionnant de façon antagoniste : un système rouge-vert, un système jaune-bleu et un système blanc-noir.

Saturation. L'une des trois dimensions de la couleur variant de l'achromatique au chromatique (du centre au pourtour dans des plans horizontaux dans le solide des couleurs). Synonyme dans le système de Munsell : pureté. En anglais : *Chroma*.

Sensation. Expérience cognitive la plus élémentaire. Selon les empiristes classiques, la perception serait construite à partir des sensations. Cette conception de la relation entre sensation et perception n'est plus guère retenue aujourd'hui.

Soustractif (Mélange ... des couleurs). Mélange de couleur dont la résultante est moins lumineuse que chacune des couleurs de base utilisées. Synonyme : Synthèse soustractive. En anglais : *Subtractive colour mixture, subtractive colour stimulus synthesis*.

Subjectives (Couleurs). Impressions chromatiques produites par un stimulus achromatique. On peut produire de tels effets soit au moyen d'un disque de Benham, soit par un éclairage intermittent.

Surface (Couleur de). Couleur de la lumière réfléchiée par un objet éclairé par une source lumineuse blanche.

Teinte ou Tonalité (chromatique). L'une des trois dimensions de la couleur variant grosso modo avec la longueur d'onde (sauf pour les couleurs extra-spectrales : pourpre et magenta) et définissant la variation circulaire sur des plans horizontaux dans le solide des couleurs. En anglais : *Hue*.

(Extraits de DELORME A. (1982), *Psychologie de la perception*, éd. Etudes vivantes, Montréal.)

4. Extrait de KOWALISKI P. (1978), *Vision et mesure de la couleur*, Masson, Paris, p. 228.

3. NOTES TECHNIQUES POUR LA REALISATION DU MATERIEL

- carte à gratter sur laquelle des droites concourantes en O font entre elles des angles de 60°

- feuilles de papier canson noir et de couleur

- bristol blanc (tétraèdre et pyramide à base hexagonale de hauteur 6 cm environ)

- 5 boîtes de disquettes en carton par groupe (parois externes peintes en noir, bristol blanc diffusant à l'intérieur, filtre amovible sur la face avant, ampoule sur la face arrière)

- papier diffusant placé devant le filtre (rend la source étendue et permet un éclairage uniforme des surfaces des objets)

- petites lampes halogène Osram (4 V, 0.85 A) donnant une lumière plus blanche et plus intense que celle d'une lampe à incandescence normale, alimentées par des piles de 4,5 V (Orbitec Diffusion, 157, rue Ordener, 75018 PARIS)

- filtres Jeulin, filtres Kodak ou filtres Lee pour éclairage de scène (distributeur : Mole Richardson, 95 avenue Verdier, 92120 MONTRouGE)

- les lettres du tableau coloré sont découpées dans du papier blanc et recouvertes de Letrafilm coloré adhésif (matériel de graphistes)

- pigments primaires : gouaches jaune, magenta et cyan

Les sources sont placées entre 10 et 20 cm de l'objet et une modification de la distance doit se traduire par une variation de luminosité.

4. ANALYSE D'UN ARTICLE DE VULGARISATION

L'article suivant, extrait du journal *Le Monde*, est le support d'un exercice d'analyse critique proposé aux étudiants en fin de séquence.

On s'attache principalement à organiser les éléments d'information contenus dans l'article sur les techniques de reproduction, ici l'impression en quadrichromie. En utilisant l'idée de chaîne de transformation sur la lumière, les différentes étapes du procédé sont analysées. En particulier, l'action de soustraction sur la lumière incidente est reprise ici à propos des filtres rouge, vert et bleu de sélection trichrome. On dégage le point important suivant : les clichés tramés obtenus à partir des négatifs sont respectivement utilisés pour l'encrage du papier en cyan, magenta et jaune. Superposition et juxtaposition des taches correspondent donc à la production de couleurs aussi bien par synthèse soustractive qu'additive.

Ainsi il devient possible aux étudiants de mettre en relation les termes de couleur spécifiques des imprimeurs (jaune, bleu, rouge) avec ceux utilisés dans la séquence (jaune, cyan, magenta) et de donner un sens au schéma proposé par l'auteur.

QUATRE ENCREES QUI VONT CRÉER TOUTES LES COULEURS

*La meilleure façon de comprendre
comment avec quatre encres
on peut imprimer toutes les couleurs
c'est de reprendre la boîte d'aquarelle
de notre enfance.*



L OIN des termes techniques et des définitions scientifiques ! Au risque de passer pour un vulgarisateur de bas étage, je ne vais pas vous expliquer comment on imprime en couleurs, vous parler ni de synthèse additive ou soustractive, ni d'effet trichrome, ni des encres primaires ou de la dégradation de la lumière pure, et encore moins des triangles XYZ de la commission internationale de l'éclairage, ou des mesures en degrés Celsius de telle ou telle couleur. L'important, est de comprendre comment le Monde va s'y prendre pour offrir à ses lecteurs des illustrations en couleurs.

Il n'a d'ailleurs pas attendu la mise en route de la nouvelle imprimerie pour faire de la couleur : on a, par exemple, beaucoup parlé des chaussettes rouges de M. Bérégovoy ! Dans ce cas,

comme pour un titre qui serait souligné d'un trait de couleur, ou qui apparaîtrait en noir avec un rectangle jaune, ou vert, ou rouge, il s'agit de ce que l'on appelle une impression deux couleurs (ou trois s'il y en a trois, etc.). C'est-à-dire qu'il s'agit de couleurs bien franches qui sont juxtaposées. C'est donc très différent de la quadrichromie qui a pour but de restituer sur un même document toutes les nuances du spectre solaire.

Dans le cas d'impressions en deux couleurs, le procédé est extrêmement simple : sur un cylindre de la rotative sera fixée la plaque comportant tout ce qui doit être imprimé en noir, et sur un autre cylindre la plaque comportant uniquement la couleur. La bande de papier va passer d'un cylindre à l'autre pour être, grâce à un repérage contrôlé électriquement, imprimée successivement en rouge et en noir.

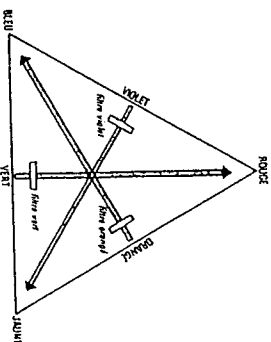
Plus complexe est la reproduction d'un document polychrome, par exemple une photographie en couleurs. Il faudra alors réaliser une quadrichromie, c'est-à-dire

imprimer successivement ce que l'on peut appeler les trois couleurs de base (bleu, rouge, jaune) et le noir.

Avant d'en arriver là, pour comprendre qu'avec seulement ces trois encres on peut faire du vert, du brun, de l'orangé, du violet, etc., prenez une feuille de papier et dessinez un triangle équilatéral. A la pointe du sommet, en haut, vous écrivez : rouge ; à celle du bas à gauche : bleu ; et à la troisième, en bas à droite : jaune. Après cela, il suffit d'avoir joué une fois dans sa vie avec une boîte ou des tubes de couleurs pour savoir qu'en mélangeant du bleu et du jaune on obtient du vert, qu'avec du rouge et du bleu on a du violet, et avec du rouge et du jaune de l'orange. Et que, par exemple, dans ce dernier cas, suivant la proportion de rouge et de jaune, on pourra aller, en dégradé, d'un orangé presque rouge, en vert millon, en haut de la ligne de droite du triangle, à un jaune « bouton d'or » en bas de cette même ligne.

Donc, à l'aide de ces trois couleurs de base, on va pouvoir

reconstituer toute la palette du spectre solaire. Encore faut-il préciser qu'il ne s'agit pas de n'importe quel rouge, bleu ou jaune, mais de tons bien définis : un rouge assez violacé que l'on appelle « magenta », un bleu que l'on appelle « cyan », le jaune continuant tout bêtement à s'appeler « jaune ». Théoriquement, le mélange de ces trois encres devrait donner du noir. Pratiquement, c'est du « presque noir », une sorte de bistre très foncé, que l'on obtient ; et, pour améliorer la qualité, en particulier pour accentuer les reliefs et les ombres, on utilise, en plus des trois encres de base, une encre noire.



Au stade de la photographure, le travail va consister, pourrait-on dire, à « décomposer » notre document polychrome — diapositive ou bromure — et à le ramener à ces trois couleurs de base, plus le noir. Pour ce faire, on va, en somme, photographier successivement le document en interposant entre celui-ci et l'objectif des filtres colorés (1) : un filtre vert qui « absorbera » le cyan et le jaune (qui formeront ses constituants) pour ne laisser passer (et photographier) que le magenta ; un filtre orangé (magenta et jaune) avec lequel on obtiendra le bleu ; et un filtre violet (magenta et cyan) avec lequel on obtiendra le jaune.

A la suite de cette opération de sélection, on a donc obtenu quatre négatifs (ou positifs dans certains procédés) : magenta, cyan, jaune et noir. Ces négatifs (ou positifs) sont évidemment tramés, c'est-à-dire que la photo se trouve décomposée en petits points microscopiques équidistants dont la surface varie suivant l'intensité du ton à obtenir. Par exemple, dans le ciel bleu, les points du film cyan seront plus gros, alors que sur le tablier rouge de la petite fille ce seront les points magenta, et ceux du jaune sur le sable de la plage.

En possession de ces quatre films, on va réaliser quatre plaques offset. Il ne reste plus qu'à disposer chacune de ces quatre plaques (celle du noir comportant aussi les textes, titres, filets, etc.) de la page sur des cylindres de la rotative : l'un sera alimenté par de l'encre magenta, les autres respectivement par les encres cyan, jaune et noir.

Lorsque la rotative sera mise en route, la bande de papier va passer d'un cylindre à l'autre pour être imprimée successivement en magenta, puis en cyan, en jaune et enfin en noir, restituant à la sortie une magnifique photo polychrome avec toutes ses nuances.

En fait, si vous regardez ce document imprimé à travers une loupe ou un compte-fils, vous ne découvrirez qu'une multitude, un semis de petits points rouges, bleus, jaunes et noirs, mais pas un seul vert, violet ou orangé. Pourtant, lorsque vous regardez la photo à l'œil nu, la prairie est bel et bien verte. Il s'agit en fait d'une illusion d'optique.

De quoi faire dire aux méchantes langues qu'une fois de plus la presse vous a menti !

LOUIS GUÉRY.

(1) Aujourd'hui, il ne s'agit plus d'une opération classique de photographie, mais de numérisation réalisée grâce à des scanners.

ANNEXE III

CARNET DE NOTES

- 1. Tableau récapitulatif des groupes mentionnés
dans le carnet de notes**
- 2. Impressions d'ensemble**

1. GROUPES MENTIONNES DANS LE CARNET DE NOTES

	1.1 addition de lumières		1.2. où se crée la couleur ?		1.3. diffusion et couleur		2. ombres colorées		3. ombre sur écran coloré	4. couleur des corps en lumière colorée
	avant	après	avant	après	avant	après	avant	après	avant	prévisions
MàN	60		60							
Styl B 91		23		23		23	16	10	8	10
TS1 Tex 91							23	7	22	16
TS1 Tex 92					21		11			8
Plast 91									22	10
Plast 92								16		
total	60	23	60	23	21	23	50	33	52	44

2 IMPRESSIONS D'ENSEMBLE

Un questionnaire d'attitude a été distribué en fin de séquence et rempli par 47 élèves. Deux groupes (TE, plasticiens : N = 19, St-A, stylistes : N = 11) ont travaillé avec l'auteur, un troisième (St-B, stylistes : N = 17) avec une autre enseignante qui a accepté de reprendre la séquence dans son ensemble, contenus et méthodes.

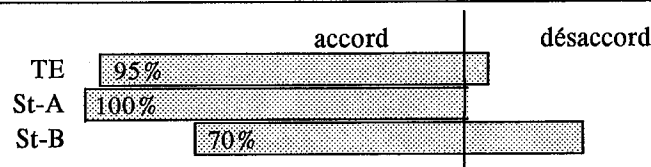
Nous indiquons ci-dessous quelques éléments d'information que donnent les réponses obtenues dans les trois groupes.

2.1. Quelques éléments des réponses

2.1.1. A propos des activités proposées, de la "façon" de faire

Manipuler

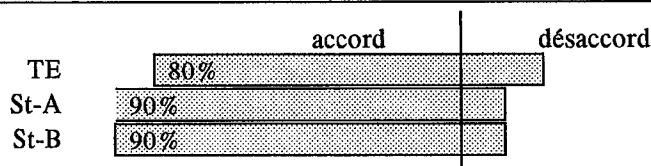
Voir sur quoi on peut agir, lorsqu'on installe la manipulation, motive pour y réfléchir



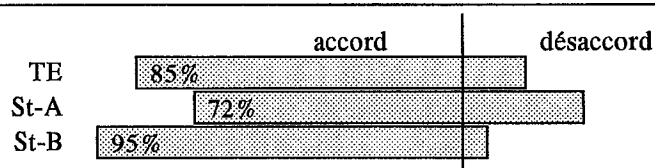
Prévoir

Prévoir et justifier une réponse avant de réaliser une manipulation ou une observation...

1. permet de mieux comprendre, même si la réponse et la justification initiales sont correctes



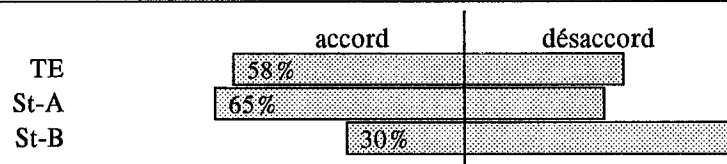
2. si celles-ci sont fausses (en contradiction avec l'observation) on peut trouver soi-même son erreur et changer de raisonnement



Les trois groupes ne présentent pas de différence significative ni avec le type de section, ni avec l'enseignant. Les étudiants manifestent leur adhésion aux activités proposées dans lesquelles ils se sont investis.

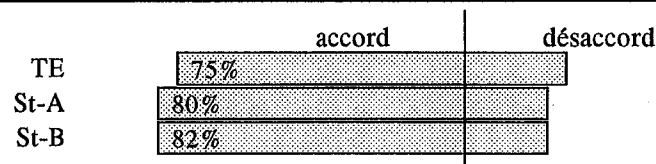
Extraire une conclusion et la rédiger

Conclure devant une expérience est très difficile, il y a trop de paramètres mis en jeu



Cet écart entre les deux groupes de stylistes peut être lié au mode d'intervention de l'enseignant, notamment à l'importance accordée aux activités de prévision et au temps laissé à la discussion en groupes. L'unanimité se fait autour de la difficulté de rédiger une conclusion générale après manipulation :

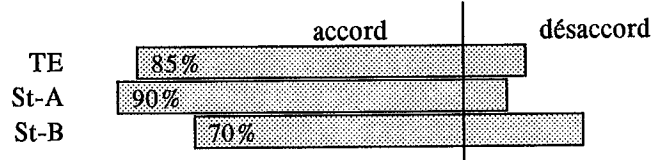
La plus grosse difficulté est de formuler ou de rédiger une conclusion générale après une manipulation.



2.1.2. au plan psychologique

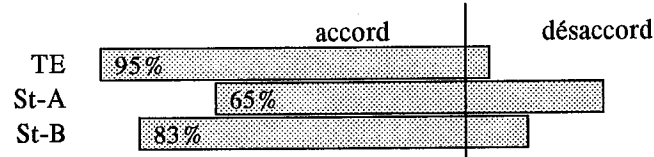
la confiance en soi, le sentiment de réussite

On m'a imposé un effort de réflexion et je me suis aperçu que je pouvais le faire

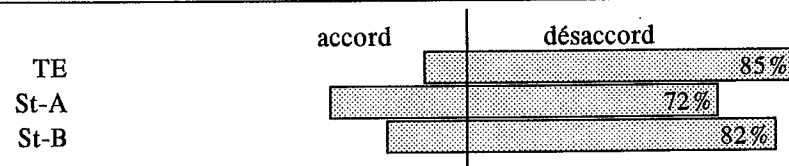


le sentiment de cohérence

J'ai l'impression d'avoir mis de l'ordre dans mes connaissances sur la couleur



J'ai fait des séries de manipulations et d'observations, mais je ne vois pas le fil conducteur de l'ensemble

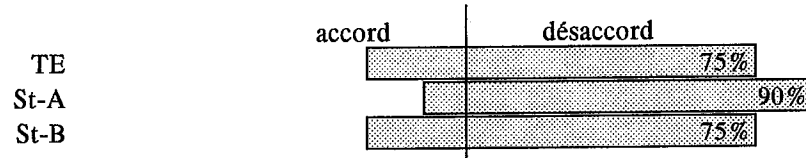


Le déroulement de la séquence, propre à chaque groupe, ne se fait pas sans cahot, dû soit à l'absentéisme individuel, soit à des événements extérieurs qui espacent les différentes séances et qui font qu'une séquence prévue pour une quinzaine d'heures peut s'étaler sur plusieurs mois. C'est ce qui peut rendre compte ici des légères différences entre groupes.

2.1.3. à propos des connaissances

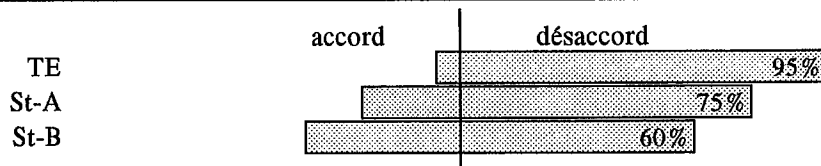
le sentiment d'avoir appris quelque chose

Je n'ai rien appris de nouveau, je n'ai fait qu'utiliser ce que je savais déjà

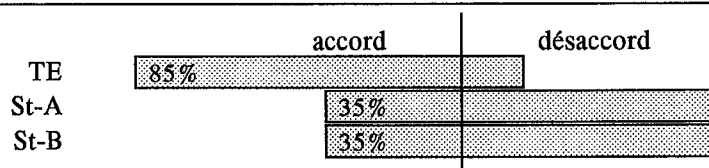


la possibilité de réinvestir dans d'autres cours

Les situations proposées n'ont rien à voir avec les cours d'arts plastiques ou d'arts appliqués



Ce que j'ai appris me sert dans d'autres cours



Les résultats à ces questions sur le caractère transférable des connaissances acquises à d'autres domaines sont liés de façon remarquable à la section et donc à l'activité professionnelle future des étudiants. Si un tiers seulement des étudiants "stylistes de mode" pensent pouvoir réinvestir dans leur activité professionnelle, par contre ce point fait pratiquement l'unanimité chez les "plasticiens de l'environnement architectural".

2. 2 Points marquants

Les réactions des trois groupes ne montrent pas de différences significatives liées à la personnalité de l'enseignant. On a tenu à en faire état ici, car c'est un élément important pour préjuger du caractère transférable de la séquence.

ANNEXE IV

PROGRAMMES DE SCIENCES PHYSIQUES : OPTIQUE

B.T.S. ARCHITECTURE INTERIEURE

Lumières simples et complexes : spectres continus et spectres de raies ; IR - visible - UV.

Emission lumineuse : corps chauffés - décharge dans les gaz - luminescence. Rayonnement du corps noir.

Influence de la lumière sur la perception de la couleur d'un objet.

Lois de Grassmann ; description des expériences de Guild et de Wright. Composantes et coordonnées trichromatiques. Diagramme de chromaticité.

Sources lumineuses : le soleil - lampes à décharge - tubes fluorescents.

Procédés d'éclairage.

B.T.S. PLASTICIEN DE L'ENVIRONNEMENT ARCHITECTURAL

- Dispersion de la lumière : spectres continus et spectres de raies ; spectres d'émission et spectres d'absorption.

- Emission lumineuse : corps chauffés - décharge dans les gaz - luminescence.

- Lois de Grassmann ; description des expériences de Guild et de Wright. Composantes et coordonnées trichromatiques. Diagramme de chromaticité.

- Absorption et réflexion de la lumière ; couleur d'un corps. Influence de la lumière sur la perception de la couleur d'un objet.

- Diffusion

- Colorants, pigments, opacifiants

B.T.S. STYLISME DE MODE, BTS ART TEXTILE ET IMPRESSION**OPTIQUE**

Dispersion de la lumière : spectres continus et spectres de raies ; spectres d'émission et spectres d'absorption ; IR - visible - UV.

Influence de la structure moléculaire sur le spectre d'absorption ; chromophores - auxochromes

Sources de lumières naturelles et artificielles.

Lois de Grassmann ; description des expériences de Guild et de Wright. Composantes et coordonnées trichromatiques. Diagramme de chromaticité.

Absorption et réflexion de la lumière ; couleur d'un corps. Colorants, pigments. Mélanges

Influence de la lumière sur la perception de la couleur d'un objet.

Reproduction des couleurs ; synthèses trichromes additive et soustractive.

DIPLOME METIER D'ART : ART DE L'HABITAT

Physique -Chimie Appliquées

1 - COMPETENCE GLOBALE

Pour obtenir le partiel 4 de l'U.V. 2

le candidat doit être capable :

- d'appréhender l'aspect scientifique des problèmes spécifiques posés dans la conception et la réalisation de ses projets.

2 - CAPACITES, CONNAISSANCES et SAVOIR FAIRE

Le candidat doit être capable de faire le lien entre les connaissances de base en sciences physiques acquises les années antérieures et les problèmes scientifiques et techniques concrets qu'il rencontrera dans sa future profession. Cela implique des connaissances à la fois théoriques et appliquées dans les domaines suivants :

2-1 La lumière et ses applications dans les arts de l'habitat

- 2-1-1 Les lois de la propagation de la lumière et ses applications pour l'éclairage d'un décor, d'un objet etc...
- 2-1-2 La qualité d'une lumière : composition spectrale, température de couleur, indice de rendu des couleurs, problème général du rendu des couleurs par la qualité de l'éclairage.
- 2-1-3 L'oeil et la vision , la vision des formes et des couleurs
- 2-1-4 La lumière LASER
Principes et applications diverses (coupe des métaux, tissus gravure... holographie).

3 - MODALITES DE CONTROLE

Contrôle continu à partir d'exercices écrits, oraux et travaux pratiques variés.

ANNEXE V

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Données :

Chaque individu est caractérisé par les modalités affectés aux 22 variables (couples retenus dans le chapitre 5) relatifs aussi bien aux aspects positifs que négatifs. Les valeurs prises par les variables sont la présence (1) ou l'absence (0) d'un couple aspect de réponse/question. Les étudiants de chaque groupe des évaluations interne et externe ont été affectés de la même masse : ce sont 71 individus. Quelques individus fictifs (affectés de masse nulle) ont été rajoutés pour visualiser des réponses typées.

Commentaires :

- de la gauche vers la droite (axe1), les étudiants sont approximativement ordonnés en fonction du nombre d'éléments positifs de réponse, c'est-à-dire de faux (F) à juste (J);

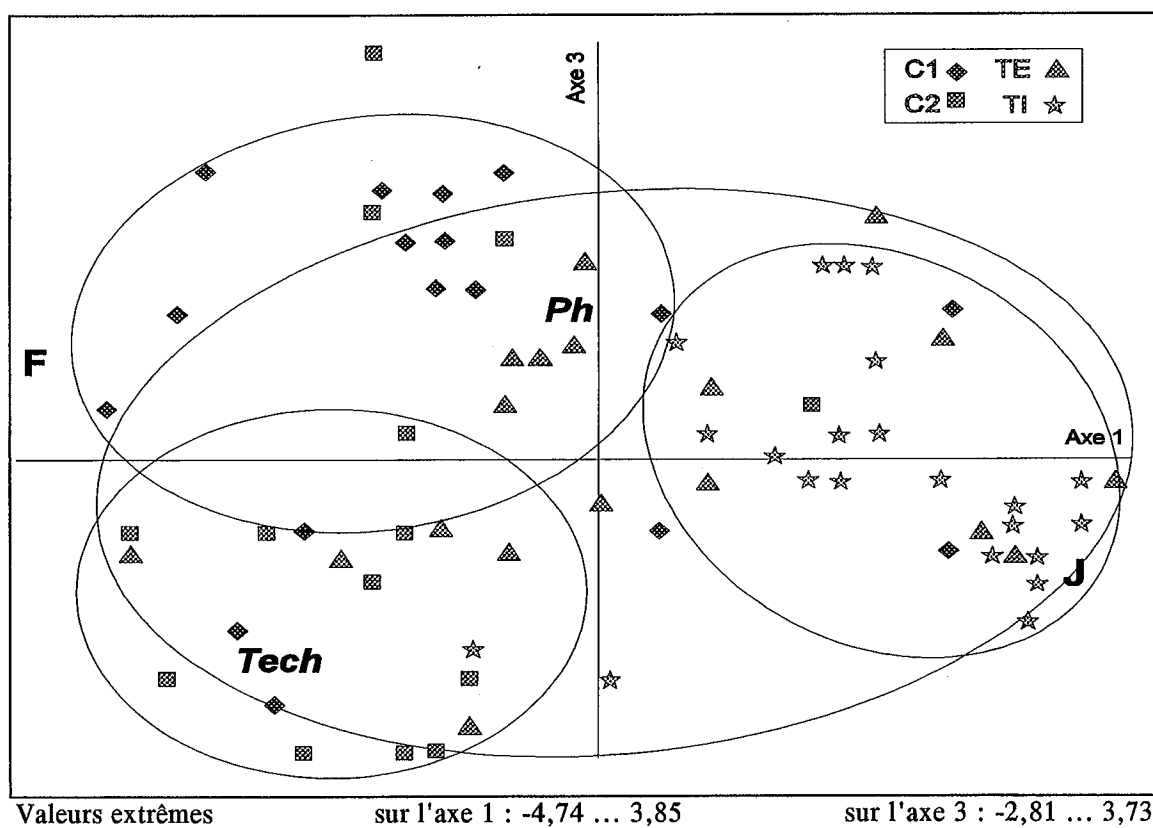
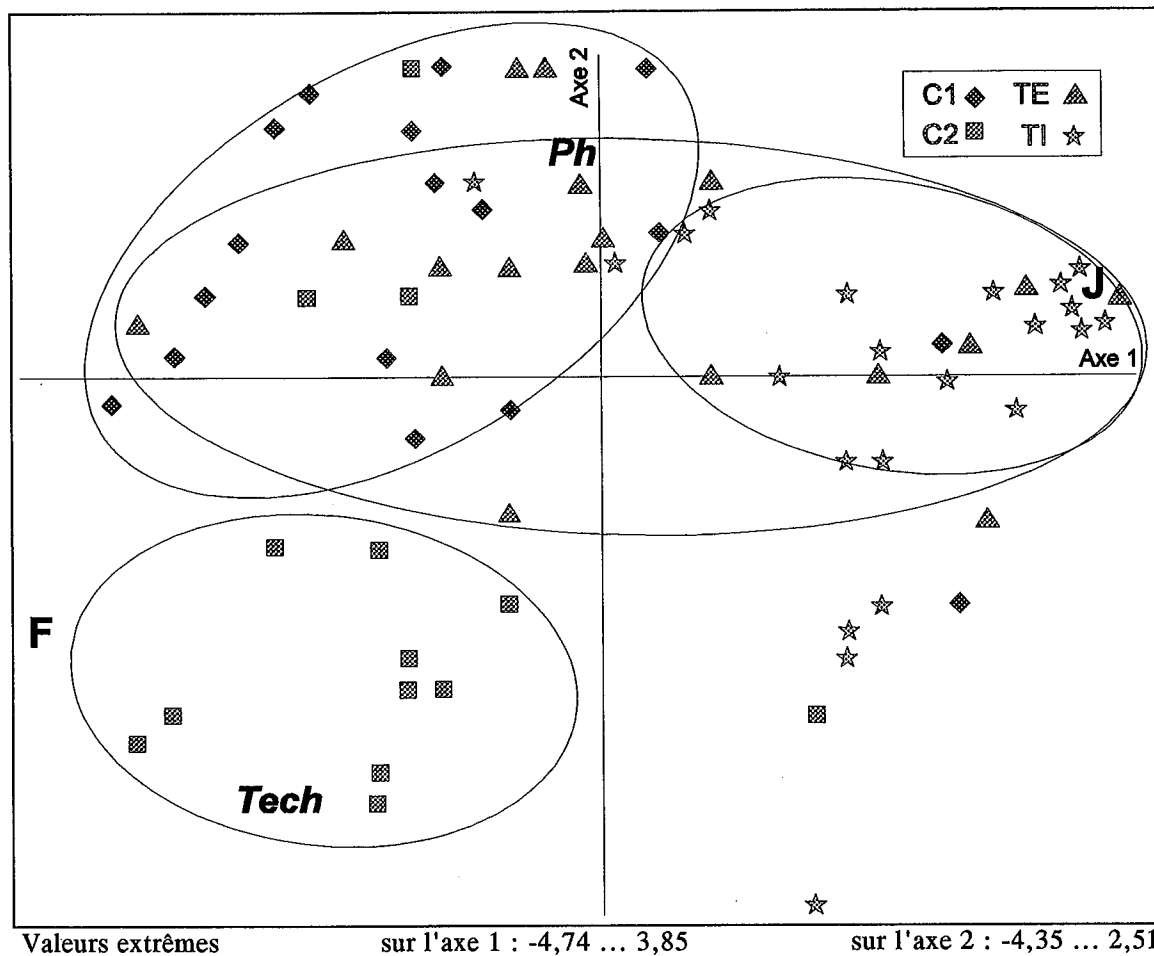
- de haut en bas (axe 2), la répartition correspond plutôt à des compétences de type physicien dominantes par rapport à des compétences de type technicien.

On obtient une représentation géométrique de la dispersion des individus dans les deux premiers plans principaux.

Tableau des données

Numéros des couples (aspect de réponse , question)

		1	13	18	2	19	22	3	16	4	14	5	20	6	7	8	17	9	21	10	11	12	15	
C L A S S E C1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	
	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
	3	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	
	4	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
	5	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	
	6	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	7	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	
	8	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	
	9	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0
	10	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	11	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
	12	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	13	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
	14	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	15	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	16	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
	17	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
C L A S S E C2	18	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	
	19	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	20	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	21	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
	22	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	
	23	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	
	24	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	25	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	26	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	
	27	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	
	28	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	29	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	30	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	31	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
C L A S S E TE	32	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	
	33	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	
	34	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	
	35	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	
	36	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	
	37	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	
	38	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	
	39	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
	40	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
	41	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	42	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
	43	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
	44	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	
	45	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
	46	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	47	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	
	48	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	49	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	
C L A S S E TI	50	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	
	51	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	
	52	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	
	53	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	
	54	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	
	55	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	
	56	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	
	57	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
	58	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	
	59	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	
	60	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
	61	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	
	62	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	
	63	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
	64	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	
	65	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	
	66	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
	67	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	
68	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0		
69	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	
70	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	
71	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	
Z E R O U N F J Ph Tech	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0										



B M A D - Version du 20/05/90

Equipe de Recherche A E G I D E - UNIVERSITE de TOULOUSE MIRAIL
Responsable Pr. Y.SCHEKTMAN

NOMBRE D'INDIVIDUS

=====

83.000000

NOMBRE DE VARIABLES

=====

22.000000

VARIABLES REDUITES

=====

DISTANCE USUELLE

=====

NOMBRE MAXIMUM DE FACTEURS PRINCIPAUX

=====

3.000000

SEUIL POUR LES MOMENTS PRINCIPAUX

=====

1.000000

** RESULTATS **

=====

VARIANCES-CORRELATIONS

=====

	1	13	18	2	19	22
1	1.000	.6761	-.8658	.2120	-.1659	-.2018
13	.6761	1.000	-.5853	.9067E-01	-.5741E-01	-.9430E-01
18	-.8658	-.5853	1.000	-.1216	.1827	.1873
2	.2120	.9067E-01	-.1216	1.000	.6325E-01	-.5153
19	-.1659	-.5741E-01	.1827	.6325E-01	1.000	.6696E-01
22	-.2018	-.9430E-01	.1873	-.5153	.6696E-01	1.000
3	.2552	.2945	-.3083	.6786E-02	.1458	-.3380E-01
16	-.2694	-.1255	.2756	-.3631E-01	-.7903E-01	.4279E-01
4	.7274E-01	.4804E-01	-.9466E-01	.2076E-01	.4517E-01	.5763E-01
14	-.7440E-01	-.2648E-01	.1622	-.4394E-01	-.9563E-01	-.3177E-01
5	.1893	.3022E-01	-.1572	.7486E-01	.9567E-01	-.2339
20	-.1659	.6279E-02	.1082	-.6883E-01	-.6073E-02	.2367
6	.2108	-.8485E-03	-.1053	.1610	.1053E-01	-.3303
7	.3384E-01	-.8931E-01	.5227E-01	.1300	-.1298	-.5838E-01
8	.1618	.1083	-.6336E-01	.2748	.8022E-01	-.1454
17	-.3135E-01	.2626E-01	.8383E-01	-.6188E-01	-.3906E-01	.1671
9	.2757	.1796	-.2236	.1301	.1308	-.6334E-01
21	.4421E-01	-.3215E-01	-.1544E-01	.3162E-01	.6883E-01	-.1088
10	.3967	.2543	-.3177	.1348	-.3209E-01	-.5632E-01
11	.3502	.2230	-.2648	.1558	-.4923E-01	-.6892E-01
12	.3524	.1888	-.2913	.1083	-.4320E-01	.3711E-01
15	-.9622E-01	-.5741E-01	.1082	.1953	-.7794E-01	-.1793E-01

	3	16	4	14	5	20
1	.2552	-.2694	.7274E-01	-.7440E-01	.1893	-.1659
13	.2945	-.1255	.4804E-01	-.2648E-01	.3022E-01	.6279E-02
18	-.3083	.2756	-.9466E-01	.1622	-.1572	.1082
2	.6786E-02	-.3631E-01	.2076E-01	-.4394E-01	.7486E-01	-.6883E-01
19	.1458	-.7903E-01	.4517E-01	-.9563E-01	.9567E-01	-.6073E-02
22	-.3380E-01	.4279E-01	.5763E-01	-.3177E-01	-.2339	.2367
3	1.000	-.6607	.2801	-.1544	-.7775E-02	.8030E-01
16	-.6607	1.000	-.1078	-.1729E-01	-.6780E-01	-.1098E-02
4	.2801	-.1078	1.000	-.4882	.1488	-.1897E-01
14	-.1544	-.1729E-01	-.4882	1.000	-.3468	.1873
5	-.7775E-02	-.6780E-01	.1488	-.3468	1.000	-.8459
20	.8030E-01	-.1098E-02	-.1897E-01	.1873	-.8459	1.000
6	.1572E-01	-.1578	-.1188	.3204E-01	.3325	-.2614
7	-.1025	-.1230	-.3719E-01	.1221	.9250E-01	-.1298
8	.2968	-.2897	.3084	-.1382	.2909	-.3081
17	-.1376	.1139	-.3354	.3261	-.1752	.5657E-01
9	.7531E-01	-.3140E-01	.2049	-.2628	.3142	-.3260
21	.1739	-.2502	-.7970E-01	.1089	.2342	-.1293
10	.5728	-.3470	.2774	-.3131	.1502	-.9719E-01
11	.4739	-.2897	.3084	-.2019	.4863E-01	.1550E-01
12	.4441	-.2598	.2384	-.2000	.1369	-.4320E-01
15	-.4440	.2327	-.2114	.1873	-.3884E-01	-.7794E-01

	6	7	8	17	9	21
1	.2108	.3384E-01	.1618	-.3135E-01	.2757	.4421E-01
13	-.8485E-03	-.8931E-01	.1083	.2626E-01	.1796	-.3215E-01
18	-.1053	.5227E-01	-.6336E-01	.8383E-01	-.2236	-.1544E-01
2	.1610	.1300	.2748	-.6188E-01	.1301	.3162E-01
19	.1053E-01	-.1298	.8022E-01	-.3906E-01	.1308	.6883E-01
22	-.3303	-.5838E-01	-.1454	.1671	-.6334E-01	-.1088
3	.1572E-01	-.1025	.2968	-.1376	.7531E-01	.1739
16	-.1578	-.1230	-.2897	.1139	-.3140E-01	-.2502
4	-.1188	-.3719E-01	.3084	-.3354	.2049	-.7970E-01
14	.3204E-01	.1221	-.1382	.3261	-.2628	.1089
5	.3325	.9250E-01	.2909	-.1752	.3142	.2342
20	-.2614	-.1298	-.3081	.5657E-01	-.3260	-.1293
6	1.000	.2686	.1466	-.1886	.1573	.2640E-01
7	.2686	1.000	.2487	.1109	-.6982E-01	.3125
8	.1466	.2487	1.000	-.3166	.1690	.8209E-01
17	-.1886	.1109	-.3166	1.000	.9847E-01	.6188E-01
9	.1573	-.6982E-01	.1690	.9847E-01	1.000	-.3400
21	.2640E-01	.3125	.8209E-01	.6188E-01	-.3400	1.000
10	.2507	.8251E-01	.3262	-.1342	.3235	.4465E-01
11	.8537E-01	.1248	.3005	-.1443	.2376	.2262E-01
12	.3167	.2331	.2149	-.6140E-01	.2414	-.4421E-01
15	.7851E-01	-.6105E-01	-.1139	.2478	-.9759E-01	-.1293

	10	11	12	15
1	.3967	.3502	.3524	-.9622E-01
13	.2543	.2230	.1888	-.5741E-01
18	-.3177	-.2648	-.2913	.1082
2	.1348	.1558	.1083	.1953
19	-.3209E-01	-.4923E-01	-.4320E-01	-.7794E-01
22	-.5632E-01	-.6892E-01	.3711E-01	-.1793E-01
3	.5728	.4739	.4441	-.4440
16	-.3470	-.2897	-.2598	.2327
4	.2774	.3084	.2384	-.2114
14	-.3131	-.2019	-.2000	.1873
5	.1502	.4863E-01	.1369	-.3884E-01
20	-.9719E-01	.1550E-01	-.4320E-01	-.7794E-01
6	.2507	.8537E-01	.3167	.7851E-01
7	.8251E-01	.1248	.2331	-.6105E-01
8	.3262	.3005	.2149	-.1139
17	-.1342	-.1443	-.6140E-01	.2478
9	.3235	.2376	.2414	-.9759E-01
21	.4465E-01	.2262E-01	-.4421E-01	-.1293
10	1.000	.8539	.8031	-.4227
11	.8539	1.000	.7171	-.4376
12	.8031	.7171	1.000	-.3917
15	-.4227	-.4376	-.3917	1.000

INERTIE DU NUAGE

=====

22.000000

NOMBRE DE FACTEURS PRINCIPAUX

=====

3.000000

VECTEURS PRINCIPAUX NORMES

=====

	1	2	3	20	6	7	8	17	9	21
1	.2921	.7637E-01	.4209	-.1216	-.4788	.1409				
13	.2019	-.3987E-01	.3986	.1413	.2976	.3223E-01				
18	-.2653	-.2858E-01	-.3938	.6113E-01	.1450	-.3995E-02				
2	.1097	.2411	.1124	.2234	.1471	-.1970				
19	.2621E-02	-.3455E-02	-.2394	-.1295	-.3626E-01	.2732				
22	-.1026	-.3275	-.1302	.1859	.1418	-.3931E-01				
3	.2920	-.2657	-.3079E-01	.4078E-01	.8092E-01	-.3712E-02				
16	-.2266	.1167	-.2823E-01	.3784	-.1412	-.5304E-01				
4	.1848	-.1013	-.3155	.3400	-.1921	-.4368E-01				
14	-.1726	-.2697E-01	.3191	.3308	-.1356	-.2671E-01				
5	.1704	.4478	-.2043	-.2044	.2587	.1891				

MOMENTS PRINCIPAUX

	1	2	3	(%)	1	2	3
1	4.953	2.499	2.146		22.51	11.36	9.756
2							

COMPOSANTES PRINCIPALES

=====							
1	2	3					
+-----+-----+-----+							
1	.2890	2.446	-.6861	42	-1.460	.8960	-.8177
2	-1.108	1.371	1.514	43	.6223	1.554	.4827
3	-3.974	-.3246	.3135	44	-.1377	.7960	1.552
4	-1.996	.2643	2.264	45	-.1587	1.137	-.6055
5	2.556	-1.849	-.8576	46	-.8288	.8680	.3818
6	-1.767	-.5862	1.818	47	.6390	.1437E-02	-.2543
7	.3329	1.116	1.291	48	-2.171	1.120	-.8666
8	-3.663	.1364	1.205	49	-.3554	1.403	.9063
9	2.519	.1373	1.145	50	3.720	.3323	-.2944
10	-1.377	2.508	1.478	51	2.693	-.6420E-02	-.3047
11	-3.086	1.153	-1.628	52	3.179	-.1939	-.4423
12	-.7692	-.3298	2.579	53	3.088	.5543	-1.014
13	-1.519	1.899	2.246	54	3.448	.7257	-1.101
14	-3.201	.6208	2.610	55	1.724	.7354	.1376
15	-2.401	2.091	-.7511	56	3.322	.4043	-1.633
16	-1.374	1.445	1.823	57	.8020	1.334	.1434
17	-2.794	1.929	-2.304	58	1.945	-1.817	1.578
18	1.470	-2.707	.2986	59	1.960	-.7489	.7635
19	-3.696	-2.936	-.8347	60	2.128	.1458	.3114E-01
20	-3.631	-2.689	-2.091	61	-.9539E-01	.8986	-2.067
21	-1.712	.7119	.2045	62	-1.115	1.433	-1.799
22	-1.864	-3.173	2.176	63	.3416	1.043	1.085
23	-1.915	-1.374	3.732	64	1.705	-.7541	-.2900
24	-2.683	-1.423	-.7112	65	3.088	.5543	-1.014
25	-2.489	.7057	-2.802	66	1.813	-2.130	1.587
26	-1.422	2.421	-2.654	67	3.001	.6216	-.7766
27	-1.570	-2.249	-2.810	68	3.726	.3245	-.8351
28	-1.579	-2.581	-.8156	69	1.886	-2.226	1.653
29	-1.275	-2.547	-2.135	70	1.388	-4.353	-.2395
30	-.9837	-1.722	1.778	71	1.176	-.5755E-01	-.1437
31	-1.853	-3.455	-1.163	72	-2.279	-.7484	-.4343
32	-.8771	-1.138	-1.070	73	-2.279	-.7484	-.4343
33	3.852	.6459	-.3030	74	-2.279	-.7484	-.4343
34	3.088	.5543	-1.014	75	-2.279	-.7484	-.4343
35	2.510	.1206	1.023	76	.9830	-.5151	.8539E-01
36	2.906	-1.068	-.7896	77	.9830	-.5151	.8539E-01
37	2.109	.4949E-01	2.024	78	.9830	-.5151	.8539E-01
38	-3.775	.3580	-1.051	79	.9830	-.5151	.8539E-01
39	-.5436	2.428	.7837	80	-4.744	-1.989	.7519
40	-.5436	2.428	.7837	81	3.448	.7257	-1.101
41	-1.264	.1565E-01	-2.420	82	-.2123	1.736	1.147
				83	-2.768	-3.422	-1.925
				+-----+-----+-----+			

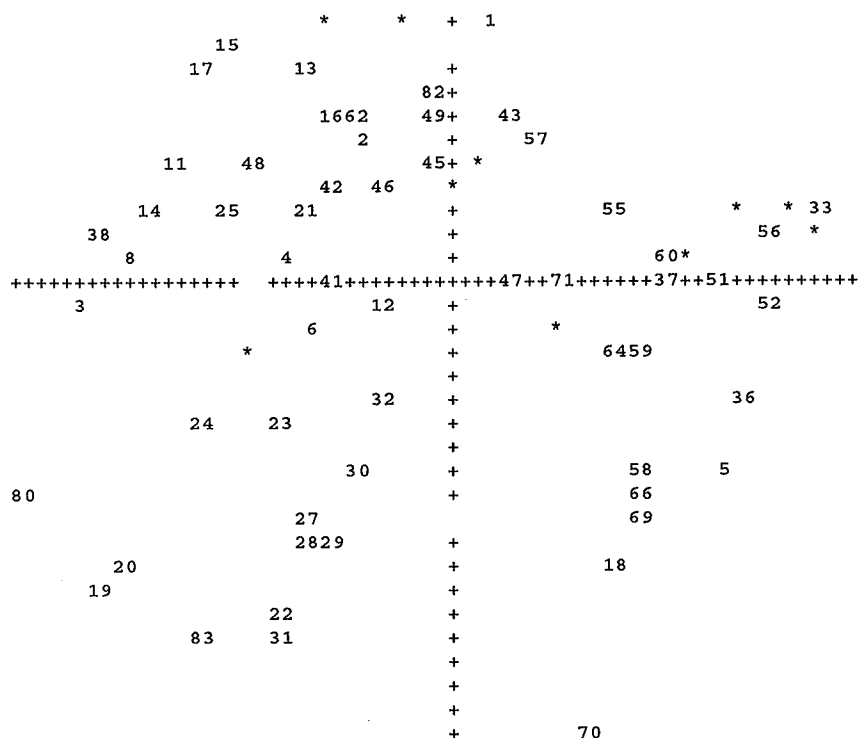
CORRELATIONS FACTEURS PRINCIPAUX * VARIABLES

=====						
	1	13	18	2	19	22
	+-----+-----+-----+-----+-----+					
1	.6500	.4493	-.5904	.2442	.5833E-02	-.2283
2	.1207	-.6303E-01	-.4517E-01	.3812	-.5462E-02	-.5178
3	.6166	.5839	-.5769	.1647	-.3507	-.1907
	+-----+-----+-----+-----+-----+					
	3	16	4	14	5	20
	+-----+-----+-----+-----+-----+					
1	.6497	-.5042	.4114	-.3841	.3793	-.2707
2	-.4200	.1845	-.1601	-.4264E-01	.7079	-.7569
3	-.4510E-01	-.4136E-01	-.4623	.4675	-.2994	.2065
	+-----+-----+-----+-----+-----+					
	6	7	8	17	9	21
	+-----+-----+-----+-----+-----+					
1	.3146	.1360	.4972	-.2881	.4137	.9077E-01
2	.4704	.2292	.2325	-.5733E-01	.2241	.1279
3	.4722E-01	-.5853E-02	-.2886	.4003	-.5759E-01	-.5438E-02
	+-----+-----+-----+-----+-----+					
	10	11	12	15		
	+-----+-----+-----+-----+					
1	.8421	.7568	.7363	-.4550		
2	-.2232	-.3037	-.2143	.4090		
3	-.7771E-01	-.6399E-01	-.3913E-01	.2770		
	+-----+-----+-----+-----+					

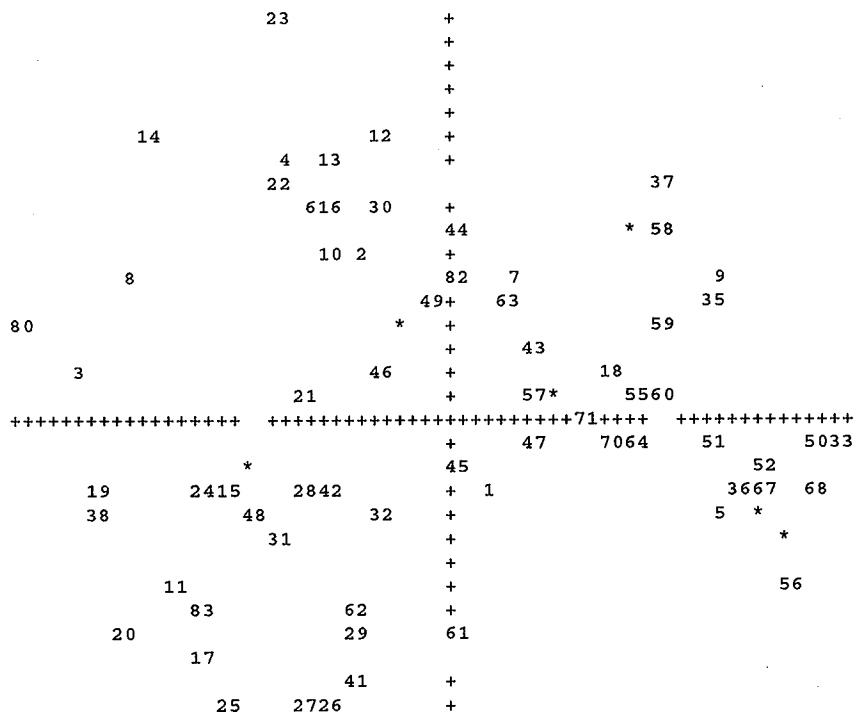
REPRESENTATION GRAPHIQUE DU NUAGE DE POINTS
SUR LES PLANS PRINCIPAUX

=====

ABSCISSES : Colonne 1
ORDONNEES : Colonne 2
valeurs extremes sur l'axe vertical -4.35258 2.50790
intervalle entre 2 lignes .2215
I 26 10 40 39 1
I---15
I 17 13
I 82
I 16 62 49 43
I 2 57
I 11 48 45 7 63
I 42 46 44 61
I 14 25 21 55 67 34 53 65 54 81 33
I 38 56 50 68
I 8 4 60 35 9
I---41 I 47 71 37 51
I 3 12 52
I 6 78 79 76 77
I 73 74 75 72 64 59
I I
I 32 36
I 24 23
I I
I 30 58 5
I 80 66
I---27 69
I 28 29
I 20 18
I 19
I 22
I 83 31
I I
I I
I I
I 70
valeurs extremes sur l'axe horizontal -4.74362 3.85213
intervalle entre 2 colonnes .1350



ABSCISSES : Colonne 1
 ORDONNEES : Colonne 3
 valeurs extremes sur l'axe vertical -2.81017 3.73184
 intervalle entre 2 lignes .2183
 I 23
 I I
 I I
 I I
 I I
 I 14 12
 I 4 13
 I---22 37
 I 6 16 30
 I 44 66 69 58
 I 10 2
 I 8 82 7 9
 I 49 63 35
 I 80 40 39 59
 I 43
 I 3 46 18
 I 21 57 76 77 78 79 55 60
 I---I 71
 I 47 70 64 51 50 33
 I 73 74 75 72 45 52
 I 19 24 15 28 42 1 36 67 68
 I 38 48 32 5 53 34 65
 I 31 54 81
 I I
 I 11 56
 I 83 62
 I 20 29 61
 I---17
 I 41
 I 25 27 26
 valeurs extremes sur l'axe horizontal -4.74362 3.85213
 intervalle entre 2 colonnes .1331



ABSCISSES : Colonne 2 ORDONNEES : Colonne 3
valeurs extremes sur l'axe vertical -2.81017 3.73184 intervalle entre 2 lignes .1770

```

I 23
I---I
I I
I I
I I
I I
I 12 14
I I
I 22 4 13
I 37
I 6 16
I---69 30
I 66 58 44 2 10
I 7
I 8 9 63 82
I 35 49
I 80 59 39 40
I I
I 46 43
I 18 3 21
I 76 77 78 79 60 55 57
I---71 I
I 70 64 51 47 50 33
I 73 74 75 72 52
I 45 1
I 19 28 5 24 36 68 67 42 48 15
I 34 65 53
I 31 32 38 54 81
I I
I I
I 56 11
I---83 62
I 20 61
I 29
I 41 17
I I
I 27 25 26
valeurs extremes sur l'axe horizontal -4.35258    2.50790
intervalle entre 2 colonnes .1079

```

```

23
+
+
+
+
+
12 + 14
+
+ 4 13
37
6 + 16
69 30
6658 + 44 2 10
+ 7
* 63 82
35 49
80 59 85 *
+
+ 46 43
18 3 + 21
* 60 55 57
+++++71+++++
70 64 * 50 33
* 52+
+ 45 1
19 28 5 24 36 + 68 674248 15
+ *
+ 38 *
+
+ 56 11
83 20 61 62
29 +
41 17
+
27 25 26

```

CONTRIBUTIONS DES INDIVIDUS A L'INERTIE DU NUAGE DE POINTS

=====

	1	2	3	4	5	6
1	1.263	.9910	2.360	1.354	1.536	1.130
	7	8	9	10	11	12
1	1.262	2.210	1.089	1.225	1.715	1.254
	13	14	15	16	17	18
1	1.503	1.886	1.394	1.680	1.704	1.353
	19	20	21	22	23	24
1	2.187	2.034	1.274	2.190	1.740	1.398
	25	26	27	28	29	30
1	1.565	1.629	2.061	1.262	1.572	1.280
	31	32	33	34	35	36
1	1.564	1.867	1.299	1.182	1.687	1.473
	37	38	39	40	41	42
1	1.935	2.541	1.344	1.344	1.098	1.288
	43	44	45	46	47	48
1	.9045	1.071	1.055	1.094	1.003	1.168
	49	50	51	52	53	54
1	.9977	1.185	1.162	1.171	1.182	1.310
	55	56	57	58	59	60
1	1.187	1.348	.9454	1.260	1.222	.9866
	61	62	63	64	65	66
1	1.170	1.517	.7450	1.582	1.182	1.146
	67	68	69	70	71	72
1	1.211	1.337	1.391	1.810	.9348	.0000
	73	74	75	76	77	78
1	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000
	79	80	81	82	83	
1	.0000	.0000	.0000	.0000	.0000	

CONTRIBUTIONS DES INDIVIDUS AUX MOMENTS PRINCIPAUX

	1	2	3		42	.6064	.4525	.4387
					43	.1101	1.361	.1529
1	.2374E-01	3.373	.3089		44	.5390E-02	.3571	1.581
2	.3493	1.059	1.505		45	.7158E-02	.7281	.2406
3	4.492	.5937E-01	.6451E-01		46	.1953	.4246	.9566E-01
4	1.133	.3936E-01	3.364		47	.1161	.1163E-05	.4245E-01
5	1.858	1.928	.4826		48	1.341	.7071	.4928
6	.8882	.1937	2.169		49	.3591E-01	1.110	.5390
7	.3151E-01	.7022	1.093		50	3.935	.6225E-01	.5686E-01
8	3.815	.1048E-01	.9526		51	2.062	.2323E-04	.6092E-01
9	1.804	.1062E-01	.8608		52	2.875	.2120E-01	.1284
10	.5394	3.545	1.434		53	2.711	.1732	.6753
11	2.708	.7497	1.740		54	3.381	.2968	.7952
12	.1682	.6129E-01	4.363		55	.8456	.3048	.1243E-01
13	.6558	2.031	3.310		56	3.138	.9214E-01	1.750
14	2.913	.2172	4.470		57	.1829	1.003	.1349E-01
15	1.640	2.465	.3702		58	1.076	1.860	1.635
16	.5367	1.176	2.181		59	1.092	.3161	.3825
17	2.220	2.097	3.483		60	1.288	.1199E-01	.6364E-03
18	.6144	4.128	.5851E-01		61	.2587E-02	.4551	2.804
19	3.884	4.857	.4572		62	.3537	1.158	2.123
20	3.749	4.076	2.870		63	.3318E-01	.6129	.7724
21	.8332	.2856	.2745E-01		64	.8271	.3205	.5517E-01
22	.9879	5.672	3.106		65	2.711	.1732	.6753
23	1.043	1.064	9.138		66	.9345	2.557	1.653
24	2.046	1.141	.3319		67	2.561	.2178	.3957
25	1.761	.2807	5.151		68	3.948	.5936E-01	.4576
26	.5750	3.302	4.621		69	1.012	2.794	1.792
27	.7006	2.851	5.182		70	.5478	10.68	.3764E-01
28	.7092	3.756	.4365		71	.3931	.1867E-02	.1356E-01
29	.4626	3.655	2.990		72	.0000	.0000	.0000
30	.2752	1.670	2.075		73	.0000	.0000	.0000
31	.9763	6.729	.8874		74	.0000	.0000	.0000
32	.2188	.7297	.7516		75	.0000	.0000	.0000
33	4.220	.2351	.6024E-01		76	.0000	.0000	.0000
34	2.711	.1732	.6753		77	.0000	.0000	.0000
35	1.791	.8198E-02	.6869		78	.0000	.0000	.0000
36	2.401	.6428	.4091		79	.0000	.0000	.0000
37	1.265	.1380E-02	2.687		80	.0000	.0000	.0000
38	4.051	.7224E-01	.7252		81	.0000	.0000	.0000
39	.8404E-01	3.321	.4030		82	.0000	.0000	.0000
40	.8404E-01	3.321	.4030		83	.0000	.0000	.0000
41	.4542	.1380E-03	3.842					

Stop - Program terminated.

RESUME

La construction d'un concept de couleur à la fois simple, cohérent et efficace dans la plupart des applications techniques, pose aux étudiants d'arts appliqués de nombreux problèmes. Les résultats recueillis au cours d'une enquête préliminaire ont permis de faire des choix pour l'élaboration d'une séquence d'enseignement.

Le contenu de celle-ci est orienté par un objectif d'intégration de connaissances et de modes de raisonnement en provenance de divers domaines (physique, technique et psychologie de la perception). La séquence est également caractérisée par des méthodes pédagogiques basées sur des activités de prévision / observation / débat.

L'observation détaillée de son déroulement (carnet de notes) permet de vérifier la présence d'obstacles (adhérence couleur et matière, difficulté à concevoir la diffusion et l'absorption sélective par la matière) et leurs divers degrés de résistance. Elle confirme le rôle de certaines situations d'enseignement comme révélateur de difficultés, déclencheur d'interrogations et stimulant pour une structuration des connaissances. Elle permet également d'analyser l'efficacité d'un enchaînement d'activités où les concepts introduits sont tour à tour cibles puis appuis pour l'apprentissage.

Un questionnaire final a été proposé immédiatement après la séquence (évaluation interne), et un an après en comparaison avec d'autres groupes (évaluation externe). L'analyse des réponses, appuyée sur l'observation fine, conduit à l'élaboration d'un outil de représentation de l'état conceptuel d'un groupe (« profil conceptuel »), état défini sur un large spectre de compétences concernant la couleur. Son utilisation a permis de savoir dans quelle mesure les objectifs de la séquence ont été atteints (notamment dans le long terme) et de connaître l'importance relative des différents obstacles.

MOTS CLES

Didactique
Enseignement
Physique
Optique
Couleur
Conceptions
Evaluation
Activités expérimentales